

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Krunoslav Haramina**

Zagreb, 2018. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Joško Deur, dipl. ing.

Student:

Krunoslav Haramina

Zagreb, 2018. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Jošku Deuru na pruženoj prilici za izradu ovog rada te na pomoći i savjetima tijekom njegove izrade. Želim se zahvaliti dr. sc. Matiji Hoiću na pomoći i diskusiji oko konstrukcije sinkrona, kao i mag. ing. Vanji Ranogajcu na pomoći oko programskog paketa AVL CRUISE.

Krunoslav Haramina



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu               |        |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum                               | Prilog |
| Klasa:                              |        |
| Ur.broj:                            |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Krunoslav Haramina**

Mat. br.: 0035199101

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Modeliranje i simulacija sinkronizacijskog sklopa automatske transmisije s dvostrukom spojkom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Modelling and simulation of synchronizer for a dual clutch automatic transmission**

Opis zadatka:

Komponente postojećih sustava manualnih transmisija koriste se kao osnova izvedbe nekih tipova automatskih transmisija, kao što su automatizirana manualna transmisija (AMT), transmisija na bazi dvostrukih spojki (DCT) te paralelne hibridne transmisije. Pored jedne ili više tarnih spojki, ulogu aktuatora kod ovih automatskih transmisija ima i sinkronizacijski sklop. Cilj završnog rada je razraditi, u AVL CRUISE okruženju implementirati te simulacijski ispitati model sinkronizacijskog sklopa kao podmodel postojećeg modela DCT-a, što uključuje sljedeće korake:

- Pregled literature te postojećih modela sinkronizacijskog sklopa u drugim simulacijskim paketima poput Amesim;
- utvrđivanje radnih i geometrijskih parametara sklopa sinkrona za osobne automobile srednje klase;
- tvorba i parametriranje matematičkog modela sklopa sinkrona uključujući aktuatorski mehanizam;
- implementacija matematičkog modela unutar AVL CRUISE simulacijskog okruženja korištenjem korisničke (UDM) komponente temeljene na .dll izvršnoj datoteci generiranoj iz C-koda;
- provedba simulacija i analiza simulacijskih rezultata, uz osvrt na usporedbu s dostupnim rezultatima iz literature i onim dobivenim korištenjem drugih specijaliziranih softverskih alata.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu te eventualnu pomoć mentora.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

- 1. rok: 23. veljače 2018.
- 2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
- 3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
- 2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
- 3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Joško Deur

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

|   |      |
|---|------|
| SADRŽAJ .....   | I    |
| POPIS SLIKA .....   | III  |
| POPIS TABLICA.....  | V    |
| POPIS OZNAKA .....  | VI   |
| SAŽETAK.....  | VIII |
| SUMMARY .....   | IX   |
| 1. UVOD.....  | 1    |
| 1.1. Zahtjevi postavljeni na sinkronizacijski sklop .....           | 1    |
| 1.2. Klasifikacija konstrukcija sinkronizacijskog sklopa.....       | 2    |
| 1.2.1. Jednostavni sinkron s unutarnjom sinkronizacijom .....       | 2    |
| 1.2.2. Sinkron s višestrukom sinkronizacijom .....                  | 3    |
| 1.2.3. Sinkron s vanjskom sinkronizacijom .....                     | 4    |
| 1.2.4. Sinkron s lamelnom spojkom.....                              | 5    |
| 1.3. Automatska transmisija s dvostrukom spojkom .....              | 6    |
| 2. FUNKCIONALNI OPIS SINKRONA.....                                  | 8    |
| 2.1. Komponente sinkronizacijskog sklopa .....                      | 8    |
| 2.2. Proces sinkronizacije.....                                     | 9    |
| 2.2.1. Faza 1- inicijalni pomak uključne ogrlice.....               | 9    |
| 2.2.2. Faza 2- sinkronizacija brzine vrtnje .....                   | 10   |
| 2.2.3. Faza 3- deblokada prstena i sekundarni pomak ogrlice .....   | 10   |
| 2.2.4. Faza 4- indeksiranje zupčaste spojke .....                   | 11   |
| 2.2.5. Faza 5- uključivanje zupčaste spojke.....                    | 11   |
| 2.3. Radni i geometrijski parametri.....                            | 11   |
| 3. PREGLED POSTOJEĆIH MODELA SINKRONIZACIJSKOG SKLOPA .....         | 13   |
| 3.1. <i>TRSY3A – complete synchronizer with state machine</i> ..... | 13   |
| 3.1.1. Opis modela .....  | 13   |
| 3.1.2. Matematički model .....                                      | 13   |
| 3.1.3. Rezultati simulacije.....                                    | 17   |

|  |    |
|--|----|
| 3.2. Complex synchronizer .....  | 19 |
| 3.2.1. Struktura modela .....  | 19 |
| 3.2.2. Rezultati simulacije .....  | 20 |
| 4. MATEMATIČKI MODEL SINKRONIZACIJSKOG SKLOPA .....                        | 25 |
| 4.1. Matematički opis procesa sinkronizacije .....                         | 25 |
| 4.1.1. Faza 1- inicijalni pomak uključne ogrlice .....                     | 25 |
| 4.1.2. Faza 2- sinkronizacija brzine vrtnje .....                          | 27 |
| 4.1.3. Faza 3- deblokada prstena i sekundarni pomak uključne ogrlice ..... | 29 |
| 4.1.4. Faza 4- indeksiranje zupčaste spojke .....                          | 29 |
| 4.1.5. Faza 5 .....  | 31 |
| 4.2. Blok dijagrami modela sinkrona .....                                  | 31 |
| 4.3. Model aktuatora .....   | 33 |
| 5. SIMULACIJA I REZULTATI .....  | 37 |
| 5.1. Programski paket AVL CRUISE .....                                     | 37 |
| 5.2. Model vozila .....  | 37 |
| 5.3. Parametri simulacije .....  | 39 |
| 5.4. Rezultati .....   | 40 |
| 6. ZAKLJUČAK .....   | 46 |
| Dodatak A: Moment konusne spojke .....                                     | 47 |
| Dodatak B: Moment uključivanja zupčaste spojke .....                       | 49 |
| LITERATURA .....   | 50 |
| PRILOZI .....  | 51 |

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 1. Jednostavni sinkron s unutarnjom sinkronizacijom [1] .....              | 2  |
| Slika 2. Sinkron s višestrukom sinkronizacijom [1] .....                         | 4  |
| Slika 3. Sinkron s vanjskom sinkronizacijom [1] .....                            | 4  |
| Slika 4. Sinkron s lamelnom spojkom [1] .....                                    | 5  |
| Slika 5. Transmisija s dvostrukom spojkom [2].....                               | 6  |
| Slika 6. Komponente jednostavnog sinkrona s unutarnjom sinkronizacijom [2] ..... | 8  |
| Slika 7. Neutralni položaj [2] .....   | 9  |
| Slika 8. Blokiranje sinkrona [2] .....   | 10 |
| Slika 9. Uključen stupanj prijenosa [2] .....                                    | 11 |
| Slika 10. Osnovne dimenzije sinkronizacijskog sklopa [1] .....                   | 12 |
| Slika 11. Kut nagiba zuba .....  | 12 |
| Slika 12. TRSY3A komponenta sinkrona.....  | 13 |
| Slika 13. Model za simulaciju komponente sinkrona .....                          | 17 |
| Slika 14. Sila na uključnu ogrlicu .....   | 17 |
| Slika 15. Pomak uključne ogrlice.....  | 18 |
| Slika 16. Brzine vrtnje vratila i zupčanika .....                                | 18 |
| Slika 17. Moment sinkrona .....  | 19 |
| Slika 18. Model <i>Complex synchronizer</i> .....                                | 19 |
| Slika 19. Komponente modela <i>Complex synchronizer</i> .....                    | 20 |
| Slika 20. Sila na uključnu ogrlicu .....   | 21 |
| Slika 21. Pomak uključne ogrlice.....  | 21 |
| Slika 22. Brzina vrtnje zupčanika i vratila .....                                | 22 |
| Slika 23. Zakret prstena 1.....  | 22 |
| Slika 24. Moment konusne spojke .....  | 23 |
| Slika 25. Brzina uključne ogrlice .....  | 23 |
| Slika 26. Brzina uključne ogrlice- uvećano .....                                 | 24 |
| Slika 27. Shematski prikaz sinkronizacijskog sklopa .....                        | 25 |

|  |    |
|--|----|
| Slika 28. Faza 1 .....   | 25 |
| Slika 29. Modificirani klasični model trenja .....                       | 26 |
| Slika 30. Faza 2 .....   | 27 |
| Slika 31. Karnoppov model trenja.....                                    | 28 |
| Slika 32. Faza 3 .....   | 29 |
| Slika 33. Faza 4 .....   | 29 |
| Slika 34. Dodir zubi uključne ogrlica i zupčanika .....                  | 30 |
| Slika 35. Faza 5 .....   | 31 |
| Slika 36. Glavni blok dijagram modela sinkrona .....                     | 32 |
| Slika 37. Blok dijagram faze 1- inicijalni pomak uključne ogrlice.....   | 32 |
| Slika 38. Blok dijagram faza 2 i 3 .....                                 | 33 |
| Slika 39. Blok dijagram faze 4 .....                                     | 33 |
| Slika 40. Blok dijagram aktuatora.....                                   | 34 |
| Slika 41. Blok dijagram aktuatora za slobodan hod uključne ogrlice ..... | 36 |
| Slika 42. Prikaz modela vozila.....                                      | 37 |
| Slika 43. Novi model transmisije vozila .....                            | 38 |
| Slika 44. Dodane komponente modela.....                                  | 38 |
| Slika 45. Pomak uključne ogrlice i razlika u brzini vrtnje .....         | 41 |
| Slika 46. Upravljački signal i armaturni napon.....                      | 41 |
| Slika 47. Sila na uljučnu ogrlicu i moment motora.....                   | 42 |
| Slika 48. Moment konusne spojke i blokirajući moment.....                | 42 |
| Slika 49. Brzina uključne ogrlice i kut zakreta prstena.....             | 43 |
| Slika 50. Napon i struja armature.....                                   | 44 |
| Slika 51. Brzina vrtnje motora .....                                     | 44 |
| Slika 52. Moment koji djeluje na zupčanik.....                           | 45 |
| Slika 53. Tarna ploha konusne spojke.....                                | 47 |
| Slika 54. Kontakt zubi zupčaste spojke.....                              | 49 |



**POPIS TABLICA**

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1. Unutarnje varijable modela ..... | 14 |
| Tablica 2. Parametri modela sinkrona .....  | 39 |
| Tablica 3. Parametri modela aktuatora ..... | 39 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka    | Jedinica         | Opis   |
|-----------|------------------|--|
| $C_e$     | Ns/m             | Ekvivalentno prigušenje dodira u aksijalnom smjeru             |
| $C_N$     | Ns/m             | Prigušenje dodira u normalnom smjeru                           |
| $d_2$     | m                | Srednji promjer navoja vretena                                 |
| $J$       | kgm <sup>2</sup> | Moment inercije rotora motora                                  |
| $J_{SR}$  | kgm <sup>2</sup> | Moment tromosti sinkronog prstena                              |
| $F$       | N                | Sila na uključnu ogrlicu                                       |
| $F_C$     | N                | Sila Coulombovog trenja  |
| $F_{dam}$ | N                | Prigušna sila dodira zuba u aksijalnom smjeru                  |
| $F_{el}$  | N                | Elastična sila dodira zuba u aksijalnom smjeru                 |
| $F_{fr}$  | N                | Sila trenja  |
| $F_S$     | N                | Sila statičkog trenja  |
| $F_{tp}$  | N                | Sila tlačnih pločica   |
| $i$       | 1/m              | Prijenosni omjer vretena                                       |
| $i_a$     | A                | Struja armature motora   |
| $K_e$     | N/m              | Ekvivalentna krutost dodira u aksijalnom smjeru                |
| $K_N$     | N/m              | Krutost dodira u normalnom smjeru                              |
| $M$       | Nm               | Moment motora  |
| $m_S$     | kg               | Masa uključne ogrlice  |
| $M_{tr}$  | Nm               | Moment trenja motora   |
| $P$       | m                | Uspoj navoj vretena  |
| $r_{Cm}$  | m                | Srednji radijus trenja konusne spojke                          |
| $r_I$     | m                | Efektivni radijus zubi zupčaste spojke                         |
| $r_U$     | m                | unutarnji radijus konusne spojke                               |
| $r_V$     | m                | vanjski radijus konusne spojke                                 |
| $T_B$     | Nm               | Blokirajući moment   |
| $T_C$     | Nm               | Moment konusne spojke  |
| $T_{el}$  | Nm               | Moment elastičnog dodira sinkronog prstena                     |
| $T_p$     | Nm               | Primijenjeni moment  |
| $T_S$     | Nm               | Statički moment trenja   |
| $u$       | V                | Upravljački signal   |
| $u_a$     | V                | Napon armature motora  |
| $u_{bat}$ | V                | Napon baterije   |
| $u_{emf}$ | V                | Inducirana elektromotorna sila motora                          |
| $v_{rel}$ | m/s              | Brzina klizanja uključne ogrlice                               |
| $v_S$     | m/s              | Stribeckova brzina   |
| $x_I$     | m                | Pomak uključne ogrlice kod dodira sa zubima ozubljenog vijenca |

|           |   |  |
|-----------|---|--|
| $x_{max}$ | m | Maksimalni pomak uključne ogrlice                            |
| $x_r$     | m | Pomak uključne ogrlice kod dodira sa zubima prstena          |
| $x_S$     | m | Pomak uključne ogrlice                                       |
| $x_{tp}$  | m | Pomak uključne ogrlice kod dodira tlačnih pločica s prstenom |

| Oznaka             | Jedinica           | Opis  |
|--------------------|--------------------|---|
| $\alpha$           | °                  | Kut nagiba konusne spojke                   |
| $\alpha_n$         | °                  | Kut uspona vretena                          |
| $\beta$            | °                  | Kut nagiba kraja zuba                       |
| $\Delta\omega$     | rad/s              | razlika u brzini vrtnje zupčanika i vratila |
| $\varepsilon_{SR}$ | rad/s <sup>2</sup> | Kutna akceleracija sinkronog prstena        |
| $\eta$             | -                  | Iskoristivost vretena                       |
| $\mu_C$            | -                  | Faktor trenja konusne spojke                |
| $\mu_{C,sl}$       | -                  | Dinamički faktor trenja                     |
| $\mu_{C,st}$       | -                  | Statički faktor trenja                      |
| $\mu_I$            | -                  | Faktor trenja na dodiru zubi                |
| $\rho'$            | °                  | Korigirani kut trenja vretena               |
| $\varphi_{SR}$     | rad                | Kut zakreta sinkronog prstena               |
| $\varphi_{Gr}$     | rad                | Granični kut zakreta sinkronog prstena      |
| $\varphi_{max}$    | rad                | Maksimalni kut zakreta sinkronog prstena    |
| $\omega$           | rad/s              | Kutna brzina istosmjernog motora            |
| $\omega_{SR}$      | rad/s              | Kutna brzina sinkronog prstena              |
| $\omega_0$         | rad/s              | Striceckova brzina konusne spojke           |

## **SAŽETAK**

U sklopu ovog završnog rada izrađen je matematički model sinkronizacijskog sklopa te je implementiran unutar AVL CRUISE simulacijskog okruženja. Prvo je provedena analiza modela sinkronizacijskih sklopova poznatih u literaturi, te također onih danih u programskom paketu Amesim u kojem su provedene temeljne simulacije te analizirana kompleksnost pojedinog modela. Nadalje je iznesen detaljan opis procesa sinkronizacije, te je na osnovu njega razvijen matematički model sinkronizacijskog sklopa, uključujući elektromehanički aktuatorski mehanizam. Model je implementiran u programskom paketu AVL CRUISE korištenjem korisničke (UDM) komponente pisane u programskom jeziku C, te je uklopljen u postojeći model vozila s dvostrukom spojkom. Konačno, provedena je simulacija modela, te je temeljem simulacijskih rezultata analizirana dinamika uključivanja sinkronizacijskog sklopa u raznim karakterističnim fazama uključivanja.

Ključne riječi: sinkronizacijski sklop, konusna spojka, zupčasta spojka, mjenjač s dvostrukom spojkom, modeliranje, simulacija, AVL CRUISE

## **SUMMARY**

The subject of this thesis is development of a mathematical model of synchronizer and its implementation into AVL CRUISE simulation software. First, an analysis of synchronizer models known in literature is carried out, and also models given in simulation software Amesim are overviewed, simulated and analyzed including analysis of complexity of different model variants. Next, the synchronization process is described and a corresponding mathematical model is developed including submodel of an electromechanical actuator. The model is implemented in software AVL CRUISE using a user-defined mechanical component (UDM) written in the programming language C, and incorporated into an existing vehicle model based on an automatic transmission with dual-clutch transmission. Finally, simulation of the model is carried out and based on simulation responses the synchronizer dynamics are analyzed for various characteristic synchronization phases.

Key words: synchronizer, cone clutch, dog clutch, dual-clutch transmission, modelling, simulation, AVL CRUISE

## **1. UVOD**

Kao osnova izvedbe nekih tipova automatskih transmisija, kao što su automatizirana manualna transmisija (AMT), transmisija na bazi dvostrukih spojki (DCT) te paralelne hibridne transmisije koriste se komponente postojećih manualnih transmisija. Kod tih transmisija glavnu ulogu u procesu promjene stupnja prijenosa ima sinkronizacijski sklop čija je zadaća sinkronizacija brzina rotacije te prijenos okretnog momenta sa zupčanika na vratilo između kojih se sinkronizacijski sklop nalazi.

Da bi se kod manualnih transmisija izbjegle poteškoće ulaženja u zahvat parova zupčanika, oni su izvedeni na način da su zupčanički parovi svih stupnjeva prijenosa u konstantnom zahvatu, ali je jedan zupčanik u paru uležišten na svoje vratilo i slobodno rotira. Uključivanje određenog stupnja prijenosa se odvija na način da se slobodno rotirajući zupčanik spoji s vratilom i time se spoji tok snage od motora i spojke prema diferencijalu i kotačima. Spajanje zupčanika i vratila se vrši preko zupčaste spojke, no pošto brzina vrtnje zupčanika može biti vrlo različita od brzine vrtnje vratila uključivanje zupčaste spojke bi bilo vrlo teško, izazivalo bi vibracije, buku te udare koji bi dodatno opterećivali dijelove transmisije. Stoga se tijekom promjene stupnja prijenosa vrši sinkronizacija tj. izjednačavanje brzine vrtnje zupčanika i vratila. Prije uključivanja sinkronizacijskog sklopa se prekine tok snage preko glavne tarne spojke čime se prekine prijenos snage s motora na transmisiju, te smanji rotirajuća masa koju sinkronizacijski sklop treba ubrzati i omogućiti spajanje zupčanika i vratila bez udara. Sinkronizacija se vrši preko tarne konusne spojke čiji moment djeluje na ulazno vratilo sve dok se njegova brzina vrtnje ne izjednači s brzinom vrtnje pripadajućeg zupčanika.

Nakon izjednačavanja brzina vrtnje omogućeno je ukapčanje zupčaste spojke koja čvrsto spoji zupčanik i vratilo čime se omogućava prijenos snage preko tog para zupčanika odnosno vožnja u tom stupnju prijenosa transmisije. Potom se zatvaranjem glavne spojke vozila u potpunosti spoji tok snage od motora do kotača.

Sinkronizacijski sklop se može nalaziti na ulaznom i na izlaznom vratilu transmisije ovisno o prostornim ograničenjima na transmisiju. U daljnjem tekstu će se zbog jednostavnosti opisivati slučaj sinkrona smještenog na izlazno vratilo, ali svi principi vrijede i za smještaj na ulaznom vratilu.

### **1.1. Zahtjevi postavljeni na sinkronizacijski sklop**

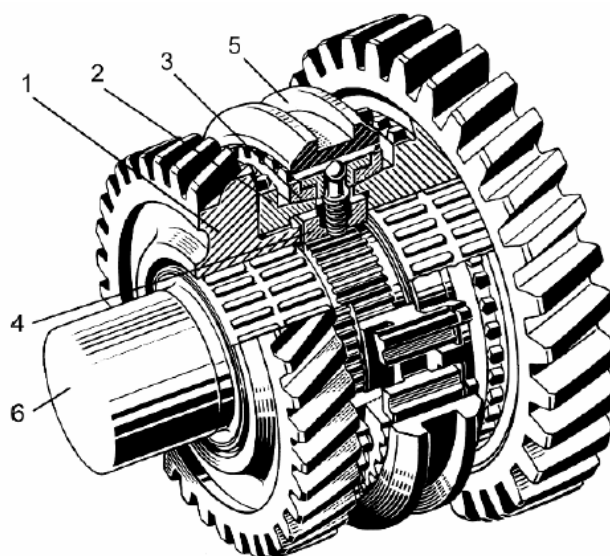
Iz opisane funkcije sinkronizacijskog sklopa slijedi da je on vrlo bitna stavka u pogledu sigurnosti vozila jer omogućava pouzdano prebacivanje stupnja prijenosa u bilo kojem trenutku. Stoga se na njega postavljaju određeni zahtjevi koji osiguravaju ispravno funkcioniranje sklopa.

Osnovni zahtjev na sinkronizacijski sklop je da bi sinkronizacijski mehanizam trebao izjednačiti brzine vrtnje dijelova koji se spajaju u vremenu između 0,1 i 0,3 sekunde koristeći minimalnu snagu. Mehanizam treba onemogućiti prerano uključivanje zupčaste spojke tako da blokira gibanje uključne vilice u vremenu dok se ne izjednače brzine vrtnje dijelova koji se spajaju. Daljnji zahtjev koji se postavlja je uspostavljanje prijenosa toka snage uključivanjem zupčaste spojke te osigurati mehanizam od neželjenog iskakanja zubiju zupčaste spojke iz zahvata.

Od pomoćnih zahtjeva najvažniji su sljedeći: sklop mora sigurno izvršavati svoju funkciju u različitim radnim uvjetima kao što su ekstremne temperature okoline, trebao bi imati dugi radni vijek te ne bi trebao biti sklon pucanju dijelova tijekom preopterećenja. Uz to je bitno da cijena sklopa bude što manja te da zauzima što manje mjesta te ima što manju masu da bi opći parametri vozila mogli bolje optimirati. Na osnovi ovih zahtjeva konstruirani su različiti oblici sinkronizacijskog sklopa od koji su neki opisani u sljedećem odlomku.

## 1.2. Klasifikacija konstrukcija sinkronizacijskog sklopa

### 1.2.1. Jednostavni sinkron s unutarnjom sinkronizacijom



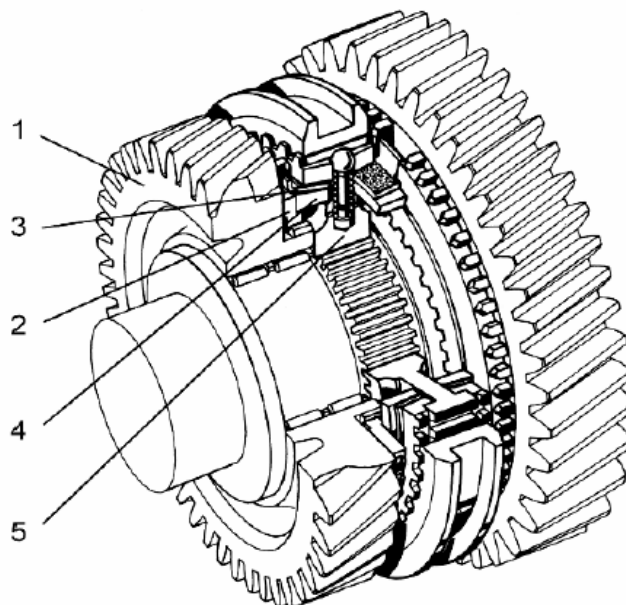
Slika 1. Jednostavni sinkron s unutarnjom sinkronizacijom [1]

Slika 1 prikazuje sinkron s unutarnjom sinkronizacijom koji je osnovna i najčešća izvedba. Proces sinkronizacije i detaljan opis komponenti će biti dan kasnije. Na izlaznom vratilu transmisije (6) je uležišten zupčanik (1) koji je u stalnom zahvatu sa zupčanicom kruto spojenim na ulazno vratilo. Na zupčanik (1) je čvrsto vezana glavina (2) na kojem se nalazu vanjska tarne ploha konusne spojke te vanjsko ozubljenje zupčaste spojke. Tijelo sinkrona (4) vezano je za vratilo (6) te se na njemu također nalazi vanjsko ozubljenje zupčaste spojke. Sinkronizacijskom mehanizmom se upravlja preko vilice koja djeluje na uključnu ogrlicu (5) i pomiče ju u aksijalnom smjeru. S unutarnje strane uključne ogrlice se nalazi unutarnje ozubljenje zupčaste spojke. Tok snage s ulaznog na izlazno vratilo može biti ostvaren samo kada je tijelo sinkrona (4) preko ozubljenja na uključnoj ogrlici (5) spojeno s ozubljenjem na glavini (2) zupčanika (1), čime je zupčanik vezan za vratilo. Da bi se zupčasta spojka mogla uključiti tj. da bi se ozubljenje na uključnoj ogrlici moglo uzubiti u ozubljenje na glavini zupčanika razlika u brzini vrtnje zupčanika i ogrlice bi trebala biti vrlo mala. To prije uključivanja sinkronizacijskog sklopa nije slučaj, jer je izlazno vratilo vezano za pogonske kotače a ulazno vratilo je u slučaju otvorene glavne spojke slobodno rotirajuće. U slučaju da je uključen sinkron nekog drugog stupnja prijenosa ulazno vratilo se okreće brzinom vrtnje proporcionalno prijenosnom omjeru zupčanika tog stupnja prijenosa što ne odgovara za bilo koji drugi stupanj. Iz toga slijedi da se tijekom promjene stupnja prijenosa kada se isključuje sinkronizacijski mehanizam za jedan stupanj prijenosa i uključuje drugi brzina zupčanika i vratila treba izjednačiti prije uključivanja zupčaste spojke. Tomu služi prsten sinkrona (3) koji s unutarnje strane ima unutarnju tarne površinu konusne spojke a s vanjske ima ozubljenje. Ozubljenje prstena koči uključnu ogrlicu tijekom sinkronizacije te prenosi aksijalnu silu na konusnu spojku koja izjednačava brzine zupčanika i vratila. Kad su brzine izjednačene prsten propusti uključnu ogrlicu i omogućiti uključivanje zupčaste spojke.

### **1.2.2. Sinkron s višestrukom sinkronizacijom**

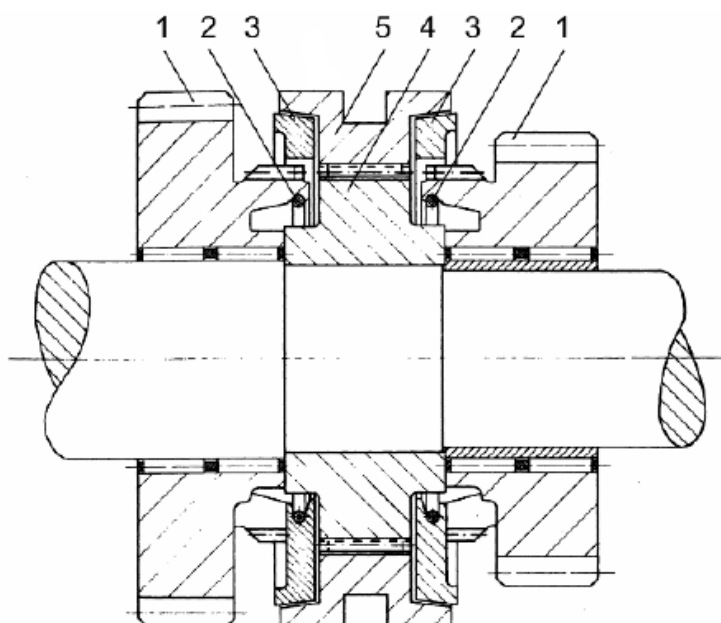
Slika 2 prikazuje sinkron s višestrukom sinkronizacijom. Kod ručnih transmisija nastoji se da ručna sila na ručicu mjenjača bude jednaka za sve stupnjeve prijenosa. Stoga se za niže stupnjeve prijenosa kod kojih je razlika u brzini vrtnje zupčanika i vratila veća, koriste sinkroni s višestrukom sinkronizacijom. Sklop sinkrona je vrlo sličan jednostavnom sinkronu s unutarnjom sinkronizacijom, no ima više tarnih površina tarne spojke koje uvećavaju moment te skraćuju vrijeme sinkronizacije. Prednost ove konstrukcije u odnosu na jednostavni sinkron s unutarnjom sinkronizacijom je produženi životni vijek zbog kraćeg vremena i puta klizanja za istu početnu razliku brzina. Glavni nedostatak je povećana kompleksnost sklopa.





Slika 2. Sinkron s višestrukom sinkronizacijom [1]

### 1.2.3. Sinkron s vanjskom sinkronizacijom



Slika 3. Sinkron s vanjskom sinkronizacijom [1]

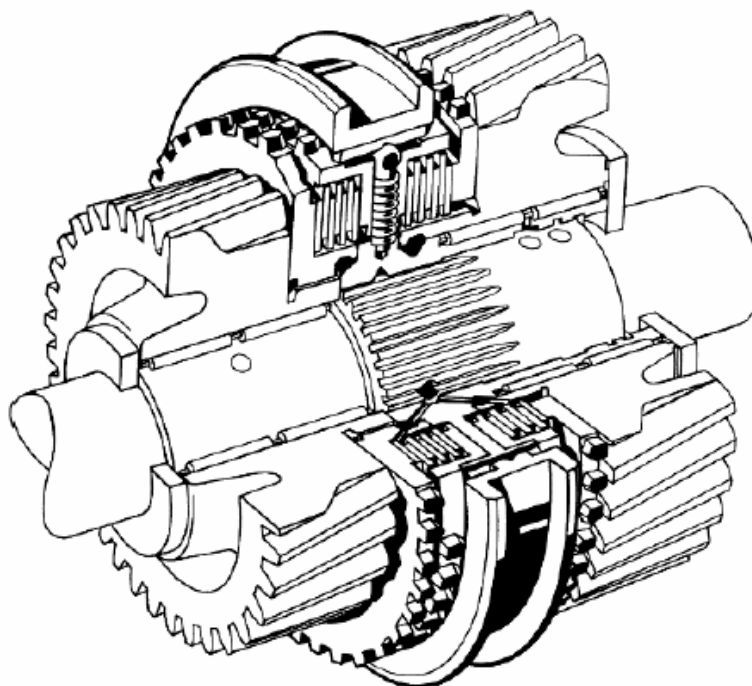
Slika 3 prikazuje sinkron s vanjskom sinkronizacijom. Razlika sinkrona s vanjskom sinkronizacijom u odnosu na jednostavan sinkron s unutarnjom sinkronizacijom je ta što je srednji radijus trenja konusne spojke veći od radijusa zubiju zupčaste spojke, tj. prsten sinkrona (3) ima s vanjske strane tarnu površinu konusne spojke a s unutarnje strane ozubljenje. Zbog većeg radijusa trenja moment tarne spojke je veći za istu primijenjenu silu na uključnu ogrlicu,

što omogućuje smanjenje kuta nagiba zubiju zupčate spojke što povećava udobnost pri promjeni stupnja prijenosa. Također se zbog veće tarne površine smanjuje površinsko opterećenje materijala tijekom klizanja.

Nedostatak ove konstrukcije je što se povećanjem radijusa konusne spojke povećava i obodna brzina za istu razliku brzina vrtnje zupčanika i vratila čime ova izvedba ima ograničenje na najveću razliku brzine vrtnje koju može sinkronizirati.

#### **1.2.4. Sinkron s lamelnom spojkom**

Kod sinkrona sa lamelnom spojkom se umjesto konusne koristi lamelna spojka. Ovaj tip sinkrona se koristi u slučajevima kada su na sinkron postavljeni posebni zahtjevi za vrijeme sinkronizacije, jer se zbog velike tarne površine mogu više opteretiti. Sinkroni s lamelnim spojkama su kompleksniji i skuplji od sinkrona s taranom spojkom.



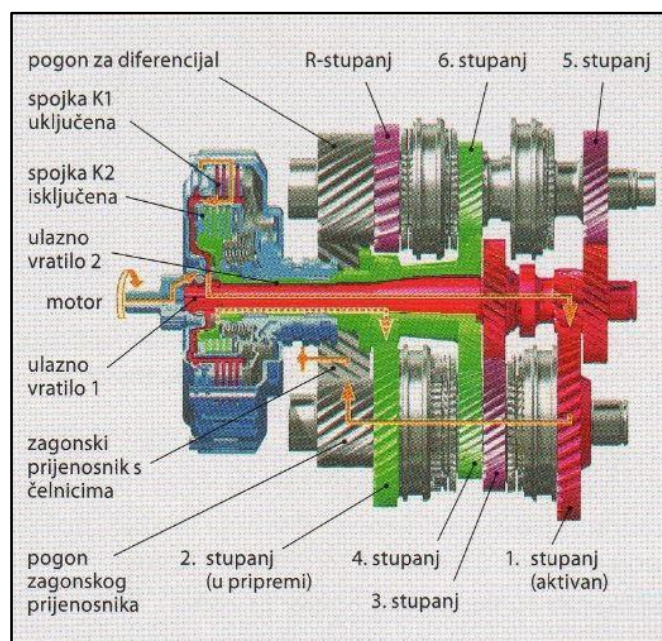
**Slika 4. Sinkron s lamelnom spojkom [1]**

U uporabi su različite vrste sinkronizacijskog sklopa kako kod ručnih mjenjača tako i kod mjenjača na bazi dvostruke spojke. U sklopu ovog rada će se detaljno razraditi jednostavni sinkron s unutarnjom sinkronizacijom na osnovu kojega će se i izvesti matematički model. Zbog vrlo sličnog principa rada izvedeni matematički model može uz male izmjene biti primijenjen i za ostale izvedbe sinkronizacijskog sklopa.

Kako je tema ovog rada modeliranje i simulacija sinkronizacijskog sklopa automatske transmisije s dvostrukom spojkom u sljedećem odlomku će biti opisan princip rada mjenjača s dvostrukom spojkom.

### 1.3. Automatska transmisija s dvostrukom spojkom

Kod ručne transmisije se nakon prekida toka snage na glavnoj spojci treba najprije isključiti jedan stupanj prijenosa a nakon toga izvršiti sinkronizacija brzine vrtnje i uključivanje drugog stupnja prijenosa, a tek nakon toga se glavnom spojkom ponovno može uspostaviti tok snage. Osim što sinkronizacija traje relativno dugo vremena što izravno produljuje i vrijeme promjene stupnja prijenosa, tijekom sinkronizacije je u potpunosti prekinut tok snage preko glavne spojke. Osnovna ideja transmisije s dvostrukom spojkom je da se sinkronizacija narednog stupnja prijenosa izvrši prije isključivanja trenutnog stupnja prijenosa. To je ostvareno primjenom dva ulazna vratila transmisije od kojih svako ima svoju spojku. Slika 5 prikazuje transmisiju s dvostrukom spojkom.



**Slika 5. Transmisija s dvostrukom spojkom [2]**

Jedno ulazno vratilo je izvedeno kao šuplje te kroz njega prolazi drugo ulazno vratilo. Na jednom vratilu su smješteni neparni stupnjevi prijenosa a na drugom parni. Kod ubrzavanja recimo u trećem stupnju prijenosa spojka vratila neparnih stupnjeva prijenosa je uključena a parnih je isključena. Računalo prepoznaje da će slijediti prebacivanje u veći stupanj prijenosa pa se preko aktuatora uključuje sinkronizacijski mehanizam četvrtog stupnja prijenosa dok je spojka vratila neparnih stupnjeva prijenosa još uključena. Nakon što je sinkronizacija završena,

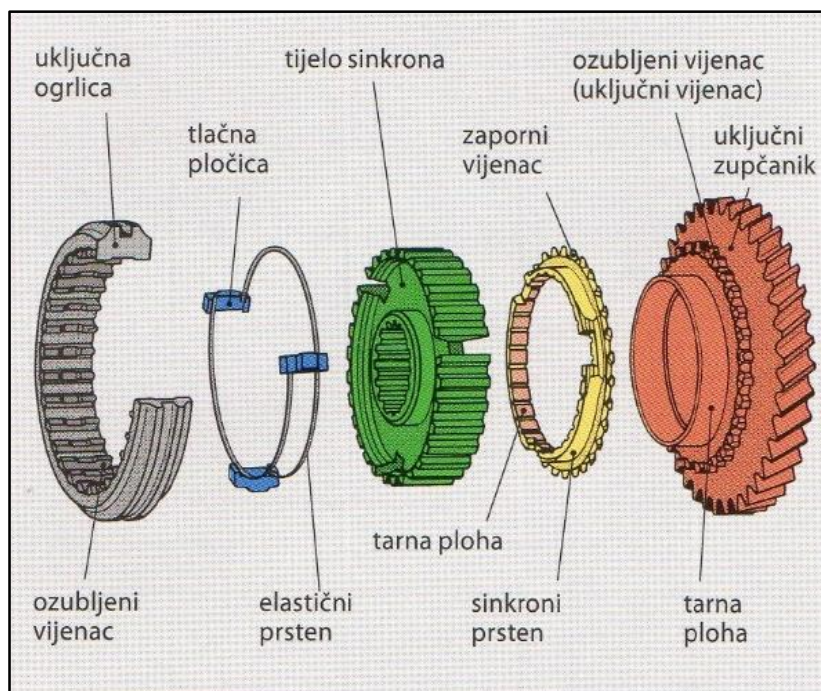
vrši se istovremeno isključivanje spojke neparnih stupnjeva i uključivanje spojke vratila parnih stupnjeva prijenosa. Ovime je izmjena stupnja prijenosa izvršena bez prekida toka snage uz kontinuirano ubrzanje vozila. Nakon promjene stupnja prijenosa aktuator isključuje sinkron trećeg stupnja prijenosa i računalo prati ponašanje vozila i po potrebi uključuje sinkron petog ili opet trećeg stupnja u slučaju da vozilo počne usporavati ili vrlo naglo ubrzavati.

Vrijeme promjene stupnja prijenosa kod ove vrste transmisije je vrlo kratko, a konstrukcija je vrlo slična ručnim transmisijama što ju čini jednostavnom, te ima veliku efikasnost pri radu. Zbog toga ova transmisija objedinjuje prednosti automatske i ručne transmisije.

Iz opisanog načina rada se lako može zaključiti da je za upravljanje ovom transmisijom vrlo važno poznavati vrijeme potrebno za sinkronizaciju stupnja prijenosa što naglašava važnost razvijanja matematičkog modela prikladnog za simulaciju. Također, postojanje modela je od posebne važnosti za razvoj sustava upravljanja sinkronizacijskim sklopovljem i cijelim prijenosnikom.

## 2. FUNKCIONALNI OPIS SINKRONA

### 2.1. Komponente sinkronizacijskog sklopa



**Slika 6. Komponente jednostavnog sinkrona s unutarnjom sinkronizacijom [2]**

Slika 6 prikazuje komponente sinkronizacijskog sklopa s unutarnjom sinkronizacijom. Tijelo sinkrona je vezano za izlazno vratilo i u svakom trenutku ima jednaku brzinu vrtnje kao i vratilo. S vanjske strane tijela sinkrona je izvedeno ozubljenje koje zahvaća unutarnje ozubljenje uključne ogrlice. Na tijelu su također izvedena tri utora koja služe za vođenje tlačnih pločica.

Na uključnu ogrlicu s vanjske strane djeluje vilica izborne poluge te ju pomiče u smjeru uključivanja stupnja prijenosa. S unutarnje strane je izvedeno ozubljenje koje služi za povezivanje tijela sinkrona i ozubljenog vijenca na zupčaniku. S unutarnje strane su također izvedeni utori u koje upadaju izbočenja na tlačnim pločicama te tako centriraju uključnu ogrlicu na tijelu sinkrona te ju održavaju u neutralnom položaju kada je sinkron isključen.

Tlačne pločice imaju nekoliko uloga u sinkronizacijskom mehanizmu. Osim što drže uključnu ogrlicu u neutralnom položaju služe i kao graničnici zakreta sinkronog prstena, te u početku uključivanja mehanizma se dio aksijalne sile na uključnu ogrlicu prenosi preko tlačnih pločica na sinkroni prsten zbog čega se uslijed momenta konusne spojke prsten zakreće. Elastični prsteni osiguravaju konstantan dodir tlačnih pločica s uključnom ogrlicom.

Sinkroni prsten služi za izjednačavanje brzina vrtnje prije uključivanja zupčaste spojke. S unutarnje strane ima tarnu plohu konusne spojke koja služi da bi silom trenja generirala moment



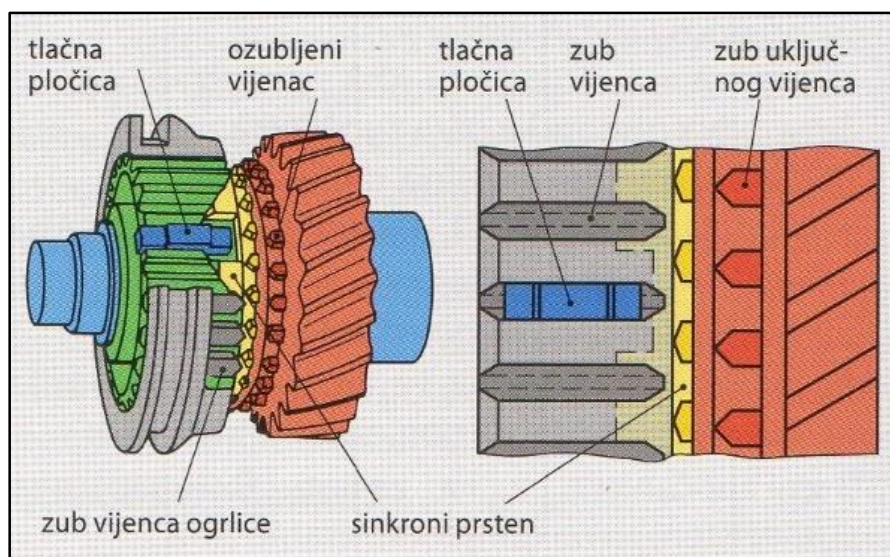
koji izjednačava brzine zupčanika i vratila. Sa strane tijela sinkrona prsten ima utore u koje ulaze tlačne pločice koje osiguravaju da se prsten vrti zajedno s tijelom sinkrona ali i da u odnosu na njega ima dopušten zakret za veličinu od otprilike četvrtine širine zuba zupčaste spojke. S vanjske strane prstena se nalazi ozubljenje. Kada je sinkroni prsten zakrenut u jednu stranu tada njegovo ozubljenje blokira prolazak uključne ogrlice te se preko njega aksijalna sila uključne ogrlice prenosi na konusnu spojku. Kada se prsten zakrene u srednji položaj zubi uključne ogrlice mogu proći između zubiju prstena čime je omogućeno uključivanje zupčaste spojke.

Uključni zupčanik je uležišten na vratilu te se na njemu nalazi tarna ploha konusne spojke na koju se naslanja tarna ploha na prstenu i ozubljeni vijenac koji preko uključne ogrlice prenosi moment sa zupčanika na vratilo kada je taj stupanj prijenosa uključen.

## 2.2. Proces sinkronizacije

Proces sinkronizacije se može podijeliti na nekoliko faza koje će nadalje biti opisane.

### 2.2.1. Faza 1- inicijalni pomak uključne ogrlice



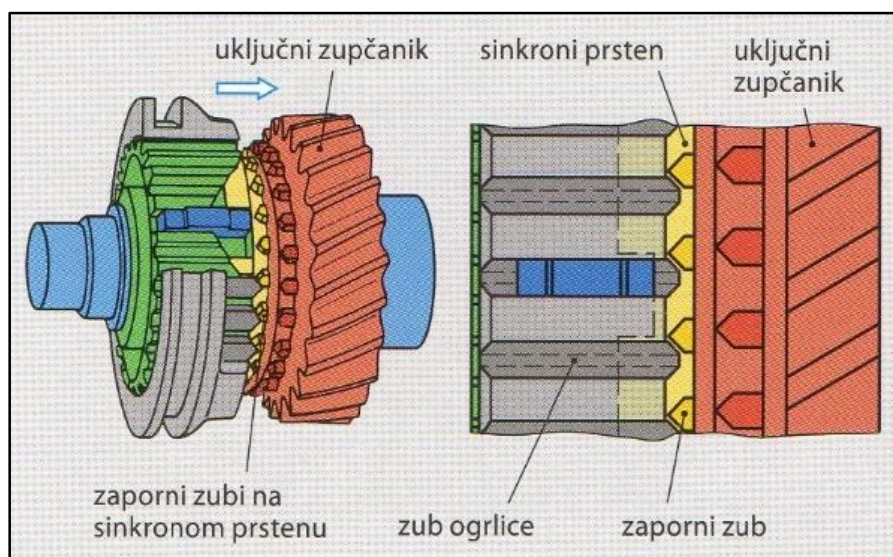
**Slika 7. Neutralni položaj [2]**

Na početku faze 1 uključna ogrlica je u neutralnom položaju te na nju počinje djelovati sila vilice. Slika 7 prikazuje neutralni položaj uključne ogrlice. Uslijed djelovanja sile aktuatora uključna ogrlica se počinje gibati u aksijalnom smjeru po ozubljenju na tijelu sinkrona. Zbog utora u uključnoj ogrlici u koji je upalo izbočenje na tlačnim pločicama tlačne pločice se također pomaknu u aksijalnom smjeru i naslone se na sinkroni prsten.

Pošto postoji razlika u brzini vrtnje zupčanika i vratila, na konusnoj spojci se uslijed djelovanja sile tlačnih pločica počne stvarati moment trenja koji zakreće sinkroni prsten sve dok se bok njegovog utora ne nasloni na tlačnu pločicu. Uključna ogrlica se giba prema ozubljenju na prstenu te u jednom trenutku tlačne pločice iskoče iz utora na ogrlici te ostanu naslonjeni na sinkroni prsten.

### 2.2.2. Faza 2- sinkronizacija brzine vrtnje

Slika 8 prikazuje dodir zubiju uključne ogrlice s ozubljenjem na sinkronom prstenu. Pošto se sinkroni prsten zakrenuo blokirao je gibanje uključne ogrlice te se na taj način aksijalna sila prenosi na konusnu spojku čiji moment izjednačava brzine zupčanika i vratila. Zbog nagiba na krajevima zubiju na prsten djeluje moment koji djeluje suprotno od momenta konusne spojke na prsten te nastoji zakrenuti prsten natrag u središnji položaj. Kut nagiba zuba je odabran tako da njegov moment zakretanja bude manji od momenta trenja dok postoji klizanje na tarnim plohamata tarne spojke.



Slika 8. Blokiranje sinkrona [2]

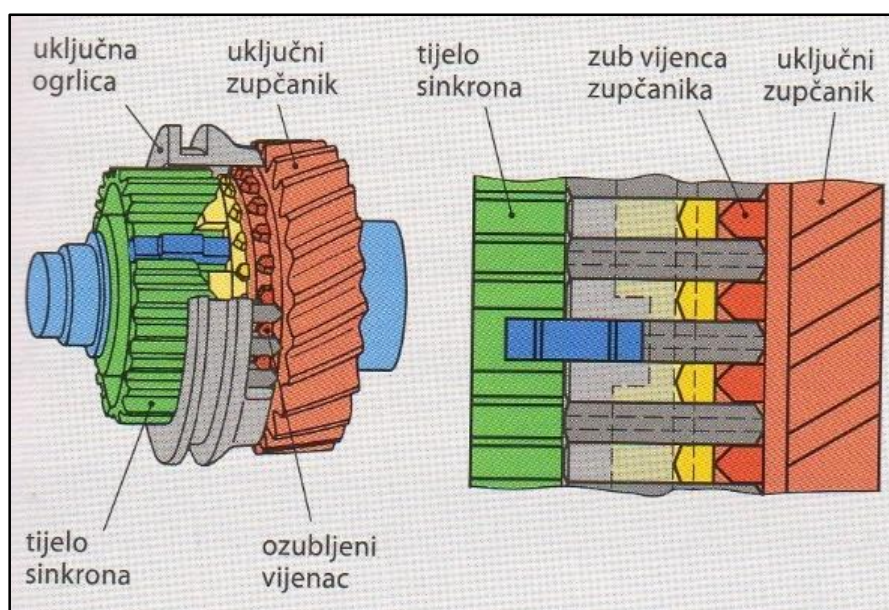
### 2.2.3. Faza 3- deblokada prstena i sekundarni pomak ogrlice

Kada se brzine zupčanika i vratila izjednače, moment kojeg prenosi sinkron se više ne troši za ubrzavanje masa zupčanika, ulaznog vratila i spojke, nego se prenosi samo moment potreban za pokrivanje gubitaka pri rotaciji ulaznog vratila. Stoga moment konusne spojke padne na iznos manji od iznosa momenta uzrokovanog nagibom zuba, te njihova razlika počinje zakretati sinkroni prsten u središnji položaj. Kada se prsten zakrene nestane prijenos aksijalne sile na ozubljenje prstena te stoga nestane i moment na konusnoj spojci. Uključnoj ogrlici je dopušten prolazak preko ozubljenja prstena te se ona nastavlja gibati prema ozubljenom vijencu na

zupčaniku. Pošto je moment konusne spojke pao na nulu zupčaniku je ponovno omogućena rotacija u odnosu na vratilo, te se uslijed viskoznog trenja spojke ponovno počinje stvarati razlika u brzini vrtnje.

#### 2.2.4. Faza 4- indeksiranje zupčaste spojke

Zubi uključne ogrlice su stupili u kontakt s ozubljenim vijencem. Zbog razlike u brzini vrtnje događa se udar zuba na zub koji rezultira impulsom momenta koji izjednačava brzinu i omogućuje indeksiranje zupčaste spojke.



Slika 9. Uključen stupanj prijenosa [2]

#### 2.2.5. Faza 5- uključivanje zupčaste spojke

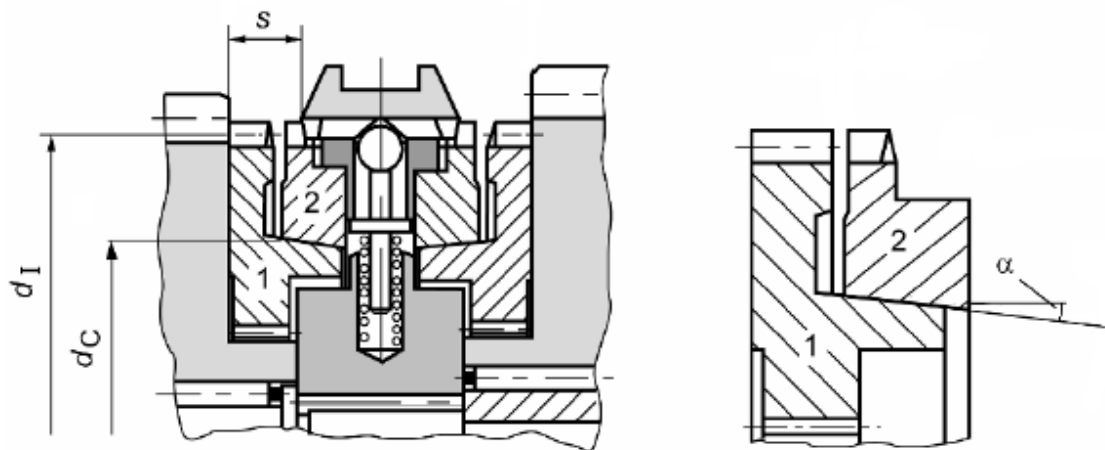
Slika 9 prikazuje stanje na završetku procesa sinkronizacije. Na slici desno se nalazi greška jer bi uključna ogrlica trebala povezati zupčanik s tijelom sinkrona, što znači da bi zubi uključne ogrlice trebali zahvaćati zube tijela sinkrona (prikazano zeleno na slici). Nakon što se brzine ponovno izjednače uključnoj ogrlici je omogućeno uključivanje zupčaste spojke čime je uključen i odgovarajući stupanj prijenosa, te se uključivanjem glavne spojke može poslati tok snage preko tog stupnja.

### 2.3. Radni i geometrijski parametri

Da bi se postigla zahtijevana razina komfora tijekom promjene stupnja prijenosa sinkronizacijski sklop treba zadovoljiti neke parametre. Vrijeme trajanja sinkronizacije bi trebalo biti u rasponu od 100 do 400 ms [1]. Kod ručnih mjenjača ručna sila na ručicu bi se trebala držati u rasponu od 80 do 120 N što s prijenosnim omjerom polužja ručice mjenjača od 1:7 do 1:12 i iskoristivošću od 70 % daje silu na uključnu ogrlicu u rasponu od 400 do 1000 N

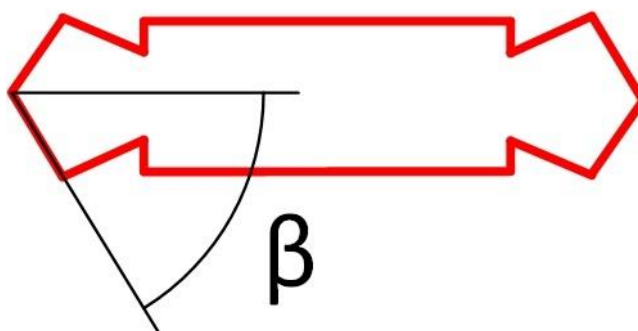


[1]. Iz navedenih zahtjeva su proizašle uobičajene vrijednosti geometrijskih parametara sinkronizacijskog sklopa. Slika 10 prikazuje osnovne dimenzije sinkronizacijskog sklopa.



**Slika 10. Osnovne dimenzije sinkronizacijskog sklopa [1]**

Uobičajena vrijednost pomaka uključne ogrlice  $s$  je od 7,5 do 13 mm. Uobičajene dimenzije sklopa prema [4] su: srednji promjer konusne spojke  $d_C$  je 45 – 50 mm, promjer ozubljenja  $d_I$  je 60 mm, kut nagiba konusne spojke  $\alpha$  je  $7^\circ$ . Vrijednost koeficijenta trenja konusne spojke se kreće oko 0,12. Slika 11 prikazuje kut nagiba kraja zuba.



**Slika 11. Kut nagiba zuba**

Kut nagiba  $\beta$  treba biti odabran tako da moment koji se generira zbog njega na sinkronom prstenu bude manji od momenta konusne spojke pri klizanju. Za gore navedene tipične parametre sinkronizacijskog sklopa te za faktor trenja zubiju zupčaste spojke od 0,04 dobije se da  $\beta$  mora biti veći od  $50^\circ$ . Uz određenu sigurnost uobičajena vrijednost kuta  $\beta$  je  $65^\circ$ .

### 3. PREGLED POSTOJEĆIH MODELA SINKRONIZACIJSKOG SKLOPA

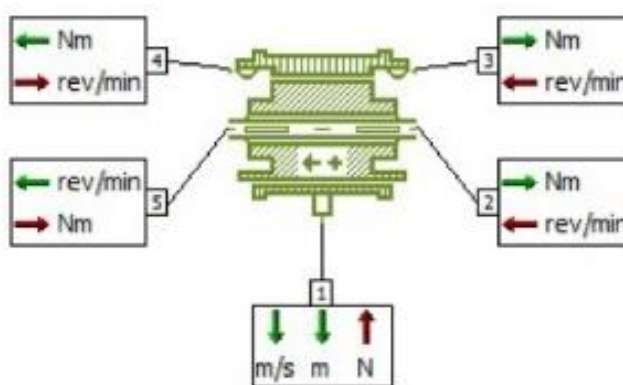
Pregled postojećih simulacijskih modela odnosi se na programski paket Amesim. Amesim je simulacijski programski paket za modeliranje, analizu i predviđanje ponašanja mehatroničkih sustava. Modeli su opisani koristeći nelinearne vremenski ovisne analitičke jednadžbe koje predstavljaju hidrauličko, pneumatsko, termodinamičko, električno ili mehaničko ponašanje sustava.

U programskom paketu je dostupni komponenta sinkrona zvana *TRSY3A – complete synchronizer with state machine* te detaljni model zvan *Complex synchronizer*. Ovi modeli su detaljnije opisani u narednim potpoglavljima.

#### 3.1. *TRSY3A – complete synchronizer with state machine*

##### 3.1.1. *Opis modela*

Ovo je model sinkrona srednje razine kompleksnosti. Pogodan je za brzo modeliranje sinkronizacijskog sklopa, te za simulacije koje se odvijaju u stvarnom vremenu pošto velika krutost kontakata nije uključena u opis modela. Slika 12 prikazuje ovu komponentu s prikazanim ulazima eksternih varijabli u komponentu.



Slika 12. *TRSY3A* komponenta sinkrona

##### 3.1.2. *Matematički model*

Modelom je opisan dvostrani sinkron što znači da jedna uključna ogrlica vrši sinkronizaciju dva različita stupnja prijenosa. U modelu je uključeno gibanje uključne ogrlice koje je posljedica sile na ulazu (1), te se preneseni moment sinkrona računa u ovisnosti o varijabli stanja sinkrona  $St$ . Tablica 1 daje popis osnovnih unutarnjih varijabli modela sinkrona

Tablica 1. Unutarnje varijable modela

| Naziv   | Oznaka   | Mjerna jedinica |
|---|----------|-----------------|
| Brzina vrtnje zupčanika na izlazu 3           | wg30     | rev/min         |
| Brzina vrtnje zupčanika na izlazu 4           | wg40     | rev/min         |
| Brzina vrtnje vratila                         | ws0      | rev/min         |
| Brzina uključne ogrlice u aksijalnom smjeru   | vsleeve  | m/s             |
| Pozicija uključne ogrlice u aksijalnom smjeru | xsleeve  | m               |
| Sila tlačne pločice                           | Fpreload | N               |
| Stanje sinkrona                               | St       | -               |

Parametri modela korišteni tijekom faze sinkronizacije:

- pozicija uključne ogrlice kada se vrši sinkronizacija
- efektivni radijus konusne spojke
- srednji dinamički koeficijent trenja
- kut nagiba konusne spojke
- prag brzine vrtnje ispod kojeg se smatra da su brzine sinkronizirane

Parametri modela korišteni tijekom faze uključivanja zupčaste spojke:

- pozicija uključne ogrlice kada se vrši uključivanje zupčaste spojke
- efektivni radijus zubiju zupčaste spojke
- kut nagiba dodira zubiju
- kutna krutost i prigušenje zupčaste spojke
- kutni zazor zupčaste spojke
- koeficijent sile tijekom isključivanja sinkrona

Na osnovi pozicije uključne ogrlice, njene brzine, te ostalih kriterija određuje se iznos varijable stanja sinkrona, a ono može biti:

0. Neutralno stanje- uključna ogrlica se nalazi između središnjeg položaja i ozubljenja na prstenu. Iz ovog stanja sinkron može ići samo u stanje 1.
1. Sinkronizacija- sila na uključnu ogrlicu se preko prstena prenosi na konusnu spojku koja izjednačava brzine vratila i zupčanika. Sinkron može ići u stanje 2 ako relativna brzina vrtnje padne ispod postavljenog praga, ili u stanje 6 ako na uključnu ogrlicu djeluje negativna sila
2. Slobodni pomak- zubi uključne ogrlice se nalaze između ozubljenja na prstenu i ozubljenja na zupčaniku. Sinkron može ići u fazu 3, 4 ili 6.

3. Početak uključivanja zupčaste spojke- Uključna ogrlica je došla do ozubljenja na zupčaniku ali je relativna brzina vrtnje veća od praga. Sinkron može ići u stanje 4 ili 6.
4. Uključivanje zupčaste spojke- uključna ogrlica se nalazi između početka ozubljenja zupčanika i krajnje pozicije. Sinkron može ići u stanje 5, 6 ili 7.
5. Kraj uključivanja- uključna ogrlica je došla do maksimalne pozicije. Sinkron može ići u stanje 4.
6. Isključivanje- Uključna ogrlica ima negativnu brzinu. Sinkron može ići u stanje 0 ili 2.
7. Prije isključivanja- uključna ogrlica koje je već uključila zupčastu spojku dolazi do pozicije početka uključivanja zupčaste spojke. Sinkron može ići u stanje 6 ili 4.

Jednadžbe za izračunavanje brzine uključne ogrlice i momenta na zupčanik i vratilo izračunavaju se u ovisnosti o stanju sinkrona.

Brzina uključne ogrlice- dobije se integriranjem akceleracije koja se računa prema:

- Stanje 0, 2, 4, 6

$$accel = \frac{F_{sleeve} - visc \cdot v_{sleeve}}{M_{sleeve}} \quad (1)$$

gdje je:

$F_{sleeve}$  – sila na uključnu ogrlicu

$visc$  – koeficijent viskoznog trenja na uključnu ogrlicu

$v_{sleeve}$  – brzina uključne ogrlice

$M_{sleeve}$  – masa uključne ogrlice

- Stanje 1, 3, 5, 7

$$accel = 0 \quad (2)$$

Moment koji djeluje na zupčanik od strane zubiju na uključnoj ogrlici

- Stanje 0, 2

$$T_{sleeve} = 0 \quad (3)$$

- Stanje 1

$$T_{sleeve} = T_{synchro} \cdot \tanh\left(2 \cdot \frac{\omega_{rel}}{d\omega}\right) \quad (4)$$

Gdje je:

$\omega_{rel}$  – relativna brzina vrtnje zupčanika u odnosu na vratilo

$d\omega$  – prag brzine vrtnje

$$T_{synchro} = |F_{sleeve}| \cdot \frac{R \cdot \mu}{\sin \alpha} \quad (5)$$

Gdje je

$R$  – efektivni radijus konusne spojke

$\mu$  – srednji dinamički koeficijent trenja

$\alpha$  – kut nagiba konusne spojke

- Stanje 3

$$T_{sleeve} = \text{sign}(\omega_{rel}) \cdot \frac{F_{sleeve}}{\tan \beta} \cdot R_{dog} \quad (6)$$

Gdje je:

$\beta$  – nagib kontakta zubiju zupčaste spojke

$R_{dog}$  – efektivni radijus kontakta zubiju

- Stanje 4, 5, 7

$$T_{sleeve} = K \cdot \theta + c \cdot \omega_{rel} \quad (7)$$

Gdje je:

$K$  – kutna krutost zubiju zupčaste spojke

$c$  – kutno prigušenje zubiju zupčaste spojke

$\theta$  – relativni kut zupčanika u odnosu na vratilo

Moment koji djeluje na zupčanik od strane mehanizma tlačne pločice

$$T_{preload} = |F_{preload}| \cdot \frac{R \cdot \mu}{\sin \alpha} \quad (8)$$

Gdje je:

$F_{preload}$  – sila tlačnih pločica

Ukupni moment koji djeluje na zupčanik

$$T = T_{sleeve} + T_{preload} \quad (9)$$

Moment koji djeluje na vratilo

$$T_5 = T_2 + T \quad (10)$$

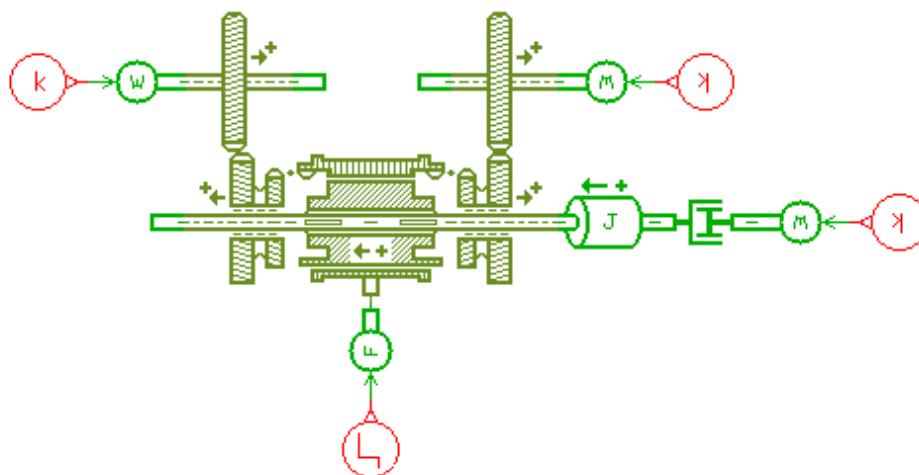
Gdje je:

$T_5$  – moment na ulazu 5

$T_2$  – moment na ulazu 2

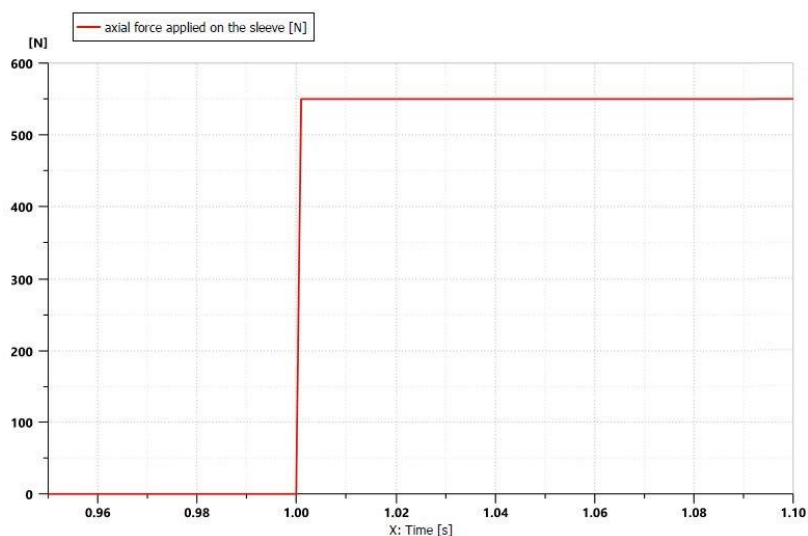
### 3.1.3. Rezultati simulacije

Provedena je simulacija čiji model prikazuje Slika 13.



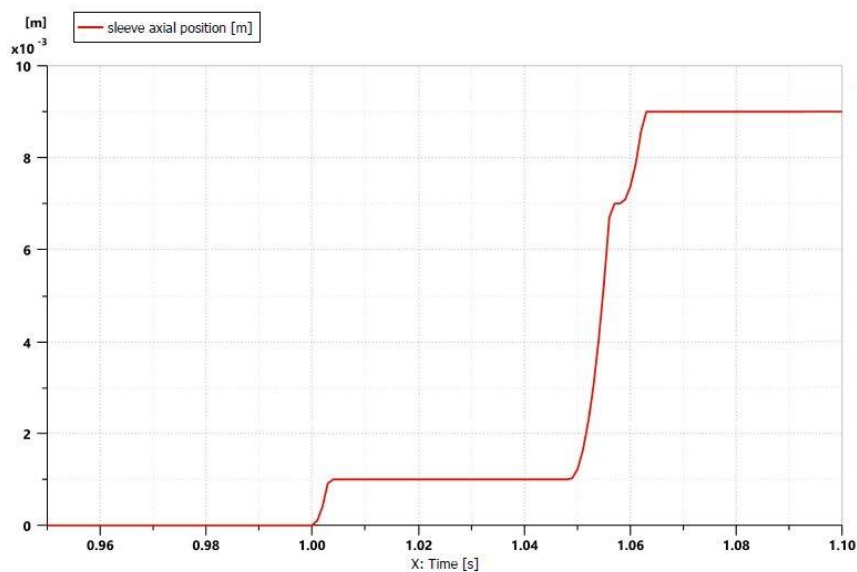
**Slika 13. Model za simulaciju komponente sinkrona**

Inercija  $J$  predstavlja moment inercije ulaznog vratila, a viskozna spojka simulira zaostali moment glavne spojke. Promatra se uključivanje lijevog stupnja prijenosa za koji postavljena konstantna brzina vrtnje od 2300 1/min. Početna brzina vrtnje ulaznog vratila je postavljena na 3800 1/min, a ulazna varijabla u simulaciju je sila na uključnu ogrlicu čiju ovisnost o vremenu prikazuje Slika 14.



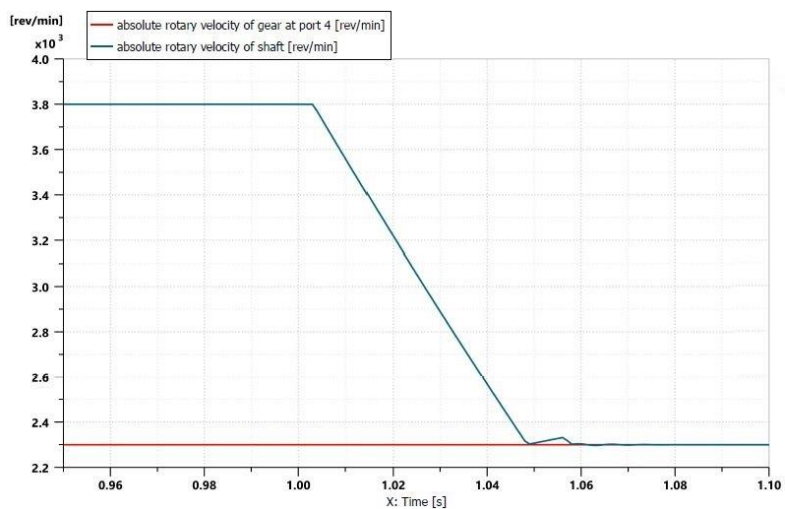
**Slika 14. Sila na uključnu ogrlicu**

Slika 18 prikazuje pomak uključne ogrlice.



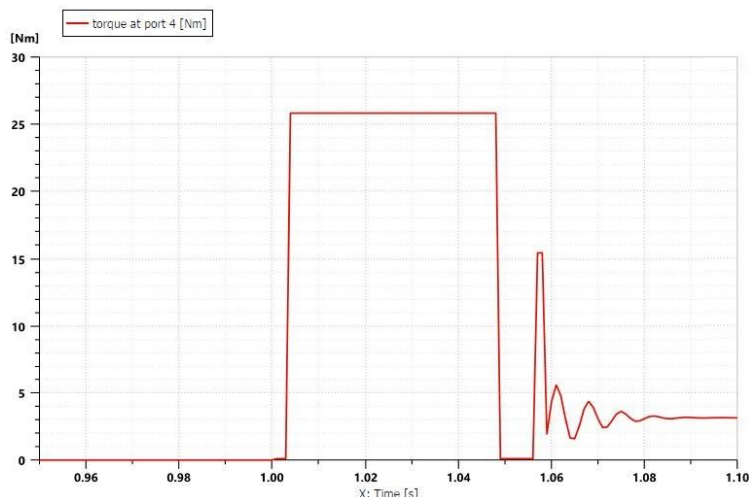
**Slika 15. Pomak uključne ogrlice**

Slika 16 prikazuje brzine vrtnje zupčanika (crvena linija) i ulaznog vratila (plava linija).



**Slika 16. Brzine vrtnje vratila i zupčanika**

Slika 17. prikazuje moment koji djeluje na zupčanic tijekom sinkronizacije.

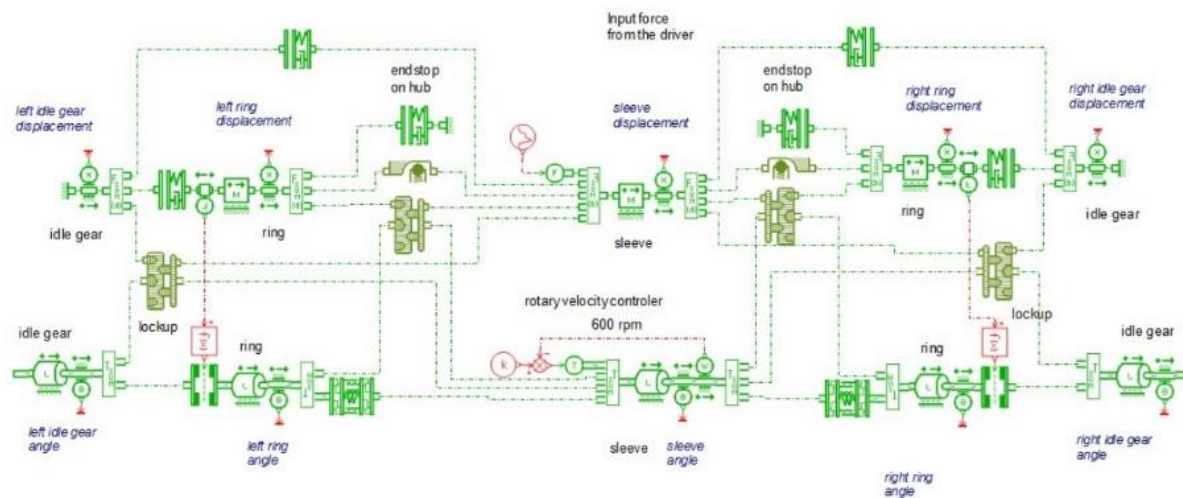


Slika 17. Moment sinkrona

### 3.2. Complex synchronizer

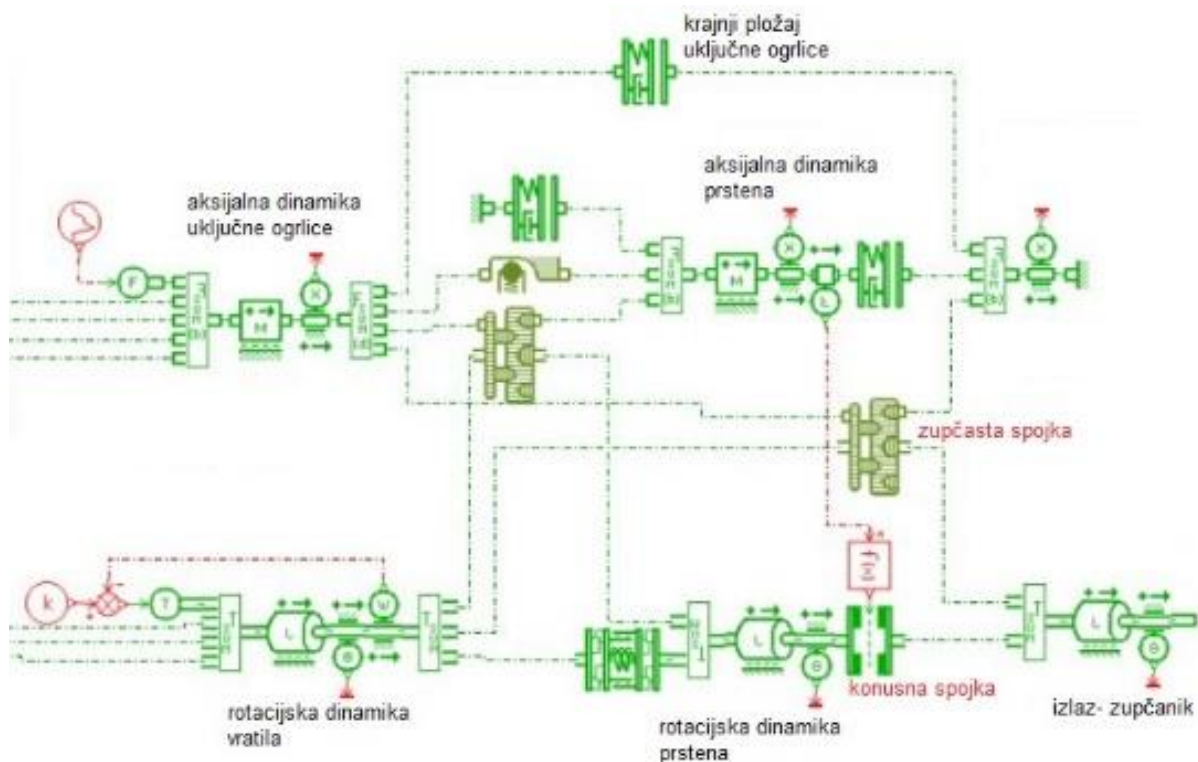
#### 3.2.1. Struktura modela

*Complex synchronizer* je model za simulaciju koji za razliku od komponente *TRSY3A* uključuje i elastičnosti kontakata zubiju zajedno s njihovim prigušenjem, kružnu i aksijalnu dinamiku sinkronog prstena te model generiranja sile tlačnih pločica. Model je namijenjen analizi komfora promjene stupnja prijenos kod ručnih mjenjača, razvoju strategije upravljanja različitim vrsta automatske transmisije, te optimiranju dimenzija zupčaste spojke. Model je sačinjen od elementarnih komponenti kao što su zupčasta spojka te tarna spojka, a njegovu strukturu prikazuje Slika 18. Dani model postoji već modeliran i dolazi s instalacijom Amesim-a s unesenim svim parametrima i zadanim profilom ulazne sile. Model je moguće modificirati, te je parametre zasebnih komponenti potrebno mijenjati u ovisnosti o uporabi modela.

Slika 18. Model *Complex synchronizer*



Slika 19 prikazuje polovicu modela *Complex synchronizer* te su na njemu označeni glavni podmodeli. Druga polovica modela je identična ovoj jer je svaka zadužena za sinkronizaciju jednog zupčanika koje ćemo u daljnjem tekstu zvati zupčanik 1 i zupčanik 2.



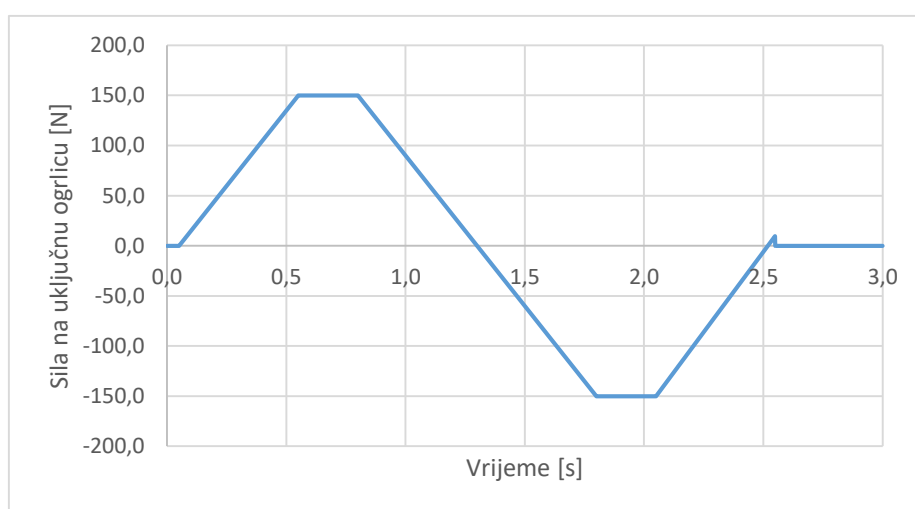
Slika 19. Komponente modela *Complex synchronizer*

### 3.2.2. Rezultati simulacije

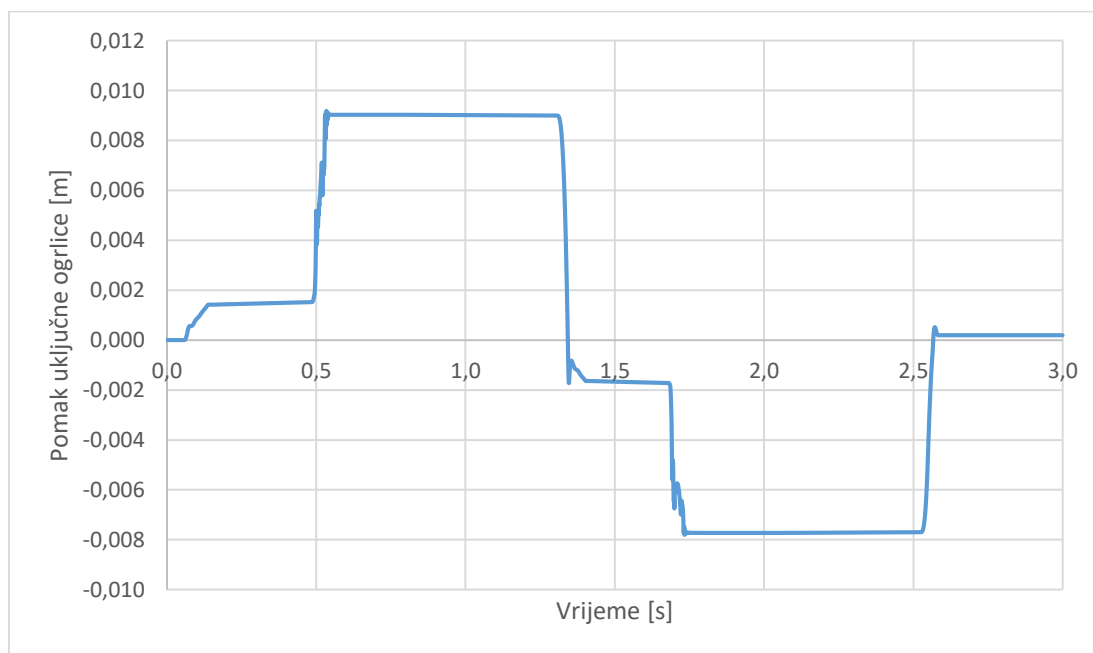
Izvršena je simulacija danog modela i u nastavku su dani rezultati. Slika 20 prikazuje profil sile koja djeluje na uključnu ogrlicu te služi kao ulazna varijabla u simulaciji jer u modelu nema modela aktuatora. Profil sile je trapeznog oblika, te je maksimalna vrijednost sile 150 N. Relativno mala sila je uzeta jer je u modelu podešena relativno mala krutost dodira zubi pa bi veća sila koja bi uzrokovala veću brzinu stvarala i velike amplitude vibracija uključne ogrlice.

Slika 21 prikazuje promjenu aksijalnog položaja uključne ogrlice u vremenu. Vidljivo je da se i pri relativno maloj ulaznoj sili stvaraju visokofrekventne vibracije zbog kojih vrijeme uzorkovanja u simulaciji mora biti vrlo malo. U ovom slučaju je vrijeme uzorkovanja postavljeno na 1 ms, no uz veće krutosti kontakta bi ono moralo biti i mnogo manje, dok jednostavniji model opisan u poglavlju 3.1 može raditi sa vremenom uzorkovanja i do 10 ms.

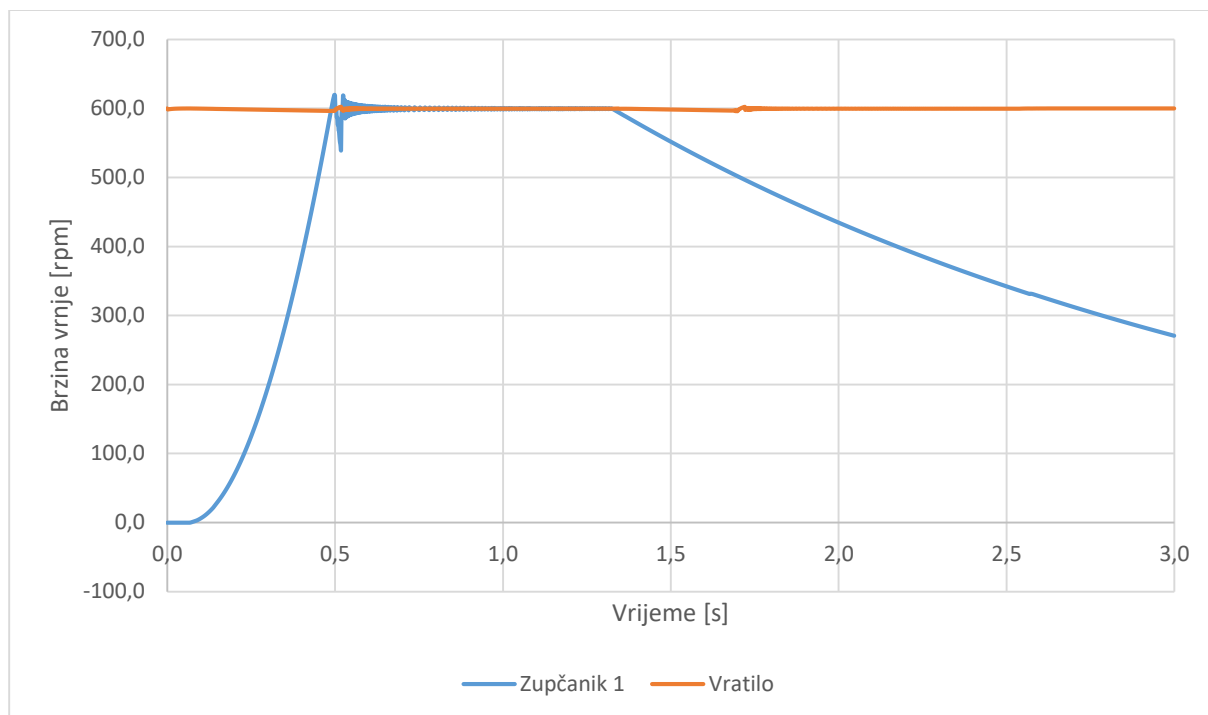
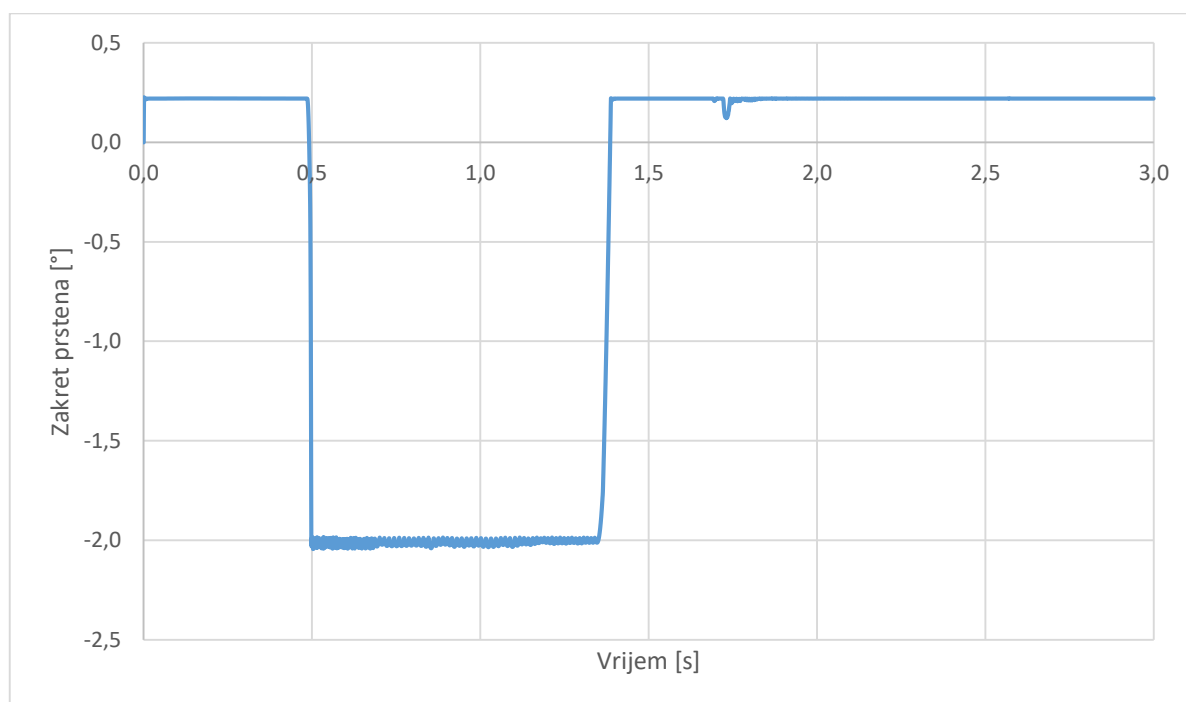
Slika 22 prikazuje promjenu brzine vrtnje vratila i zupčanika 1 u vremenu. Dugačko vrijeme sinkronizacije od oko 0,5 s se događa zbog male sile na uključnu ogrlicu. Nakon što se sinkron zupčanika 1 isključi uslijed trenja u ležajevima se zupčanik počinje usporavati. Slika 23 prikazuje promjenu zakreta sinkronog prstena zupčanika 1. Vidi se zakretanje prstena na kut zakreta od  $-2^\circ$  u trenutku kada se izjednače brzine zupčanika i vratila čime se prsten deblokira i pomak uključne ogrlice počne rasti. Slika 24 prikazuje promjenu momenta konusne spojke u vremenu. Tijekom sinkronizacije moment je proporcionalan sili, dok nakon deblokade prstena padne na nula jer se više sila ne prenosi na prsten.

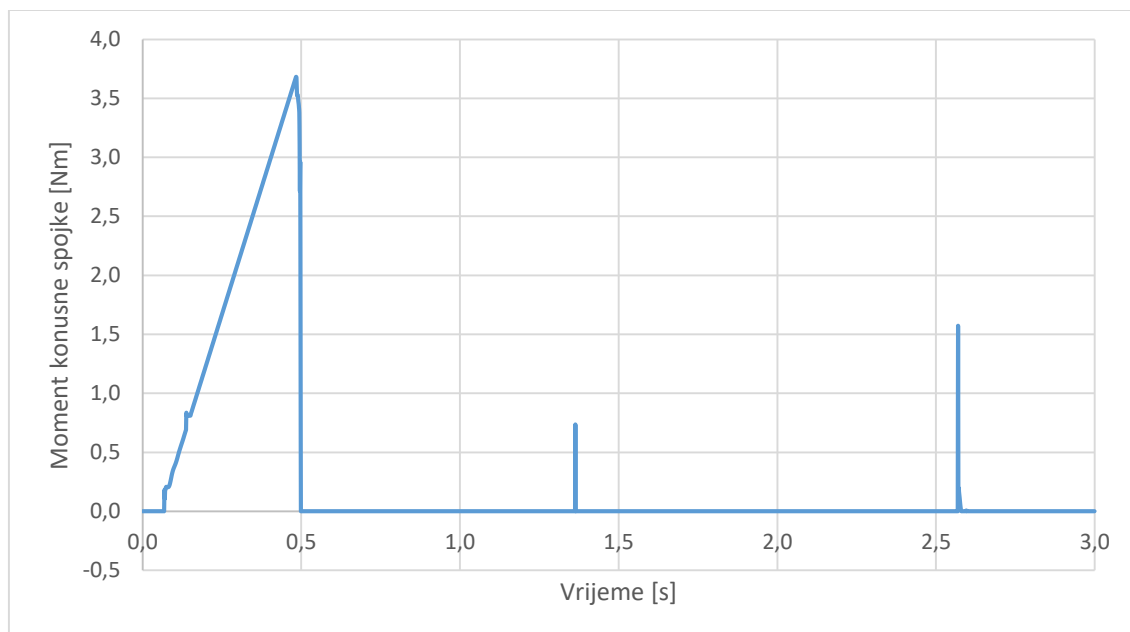


Slika 20. Sila na uključnu ogrlicu

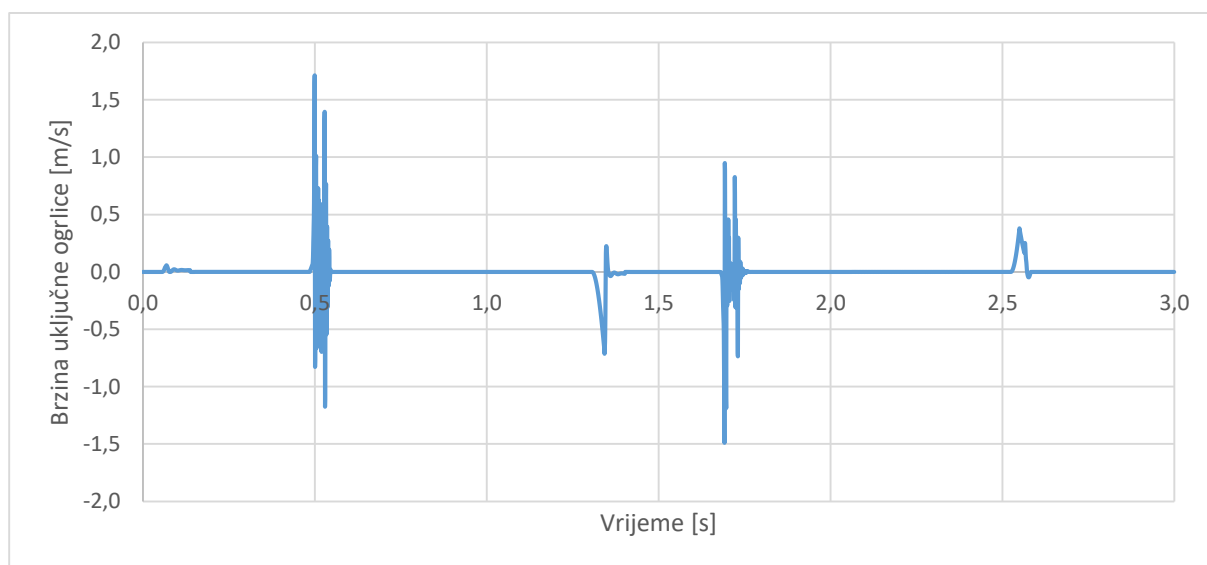


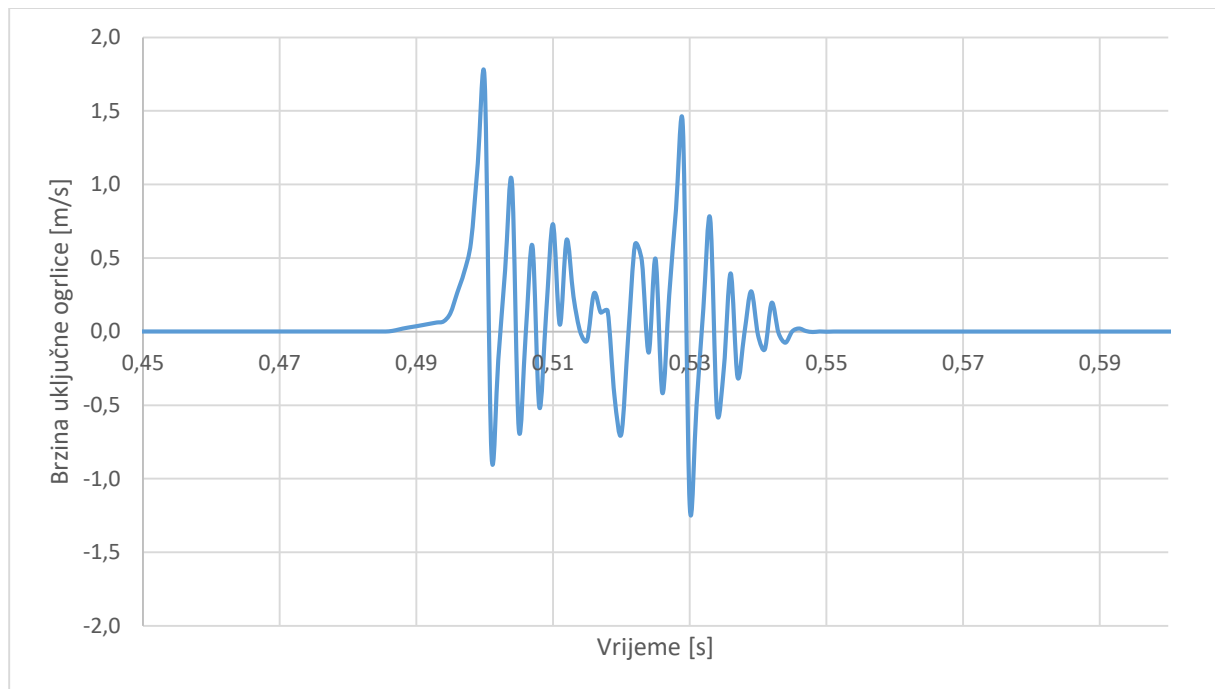
Slika 21. Pomak uključne ogrlice

**Slika 22. Brzina vrtnje zupčanika i vratila****Slika 23. Zakret prstena 1**

**Slika 24. Moment konusne spojke**

Slika 25 prikazuje promjenu brzine ukljućne ogrlice u vremenu, dok Slika 26 prikazuje uvećani period oko vremena od 0,5 s. Vibracije ukljućne ogrlice se događaju zbog deformiranja kontakta zubi zupćaste spojke, a njihova frekvencija ovisi o krutosti tog kontakta.

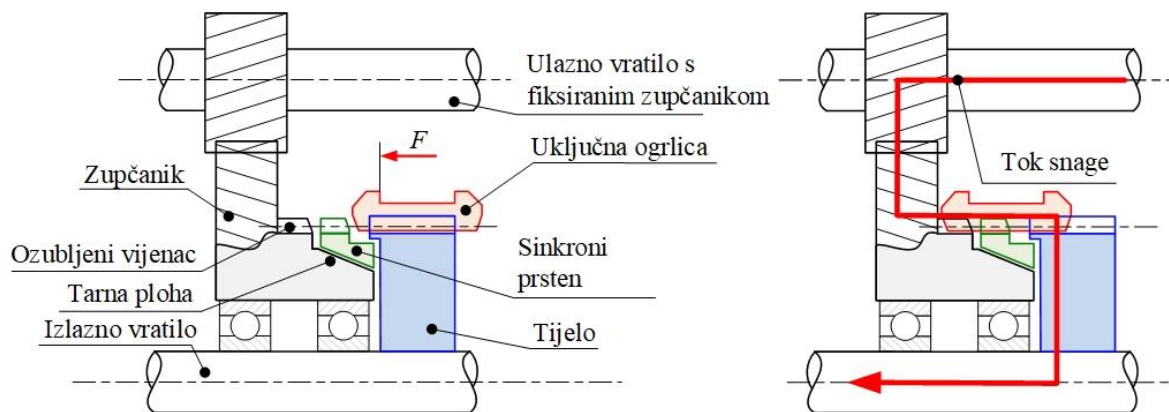
**Slika 25. Brzina ukljućne ogrlice**



**Slika 26. Brzina uključne ogrlice- uvećano**

## 4. MATEMATIČKI MODEL SINKRONIZACIJSKOG SKLOPA

U ovom poglavlju će biti opisan matematički model sinkronizacijskog sklopa razvijen u okviru ovog rada korišten u simulaciji. Slika 27 prikazuje shematski prikaz sinkronizacijskog sklopa u isključenom i uključenom položaju uključne ogrlice.

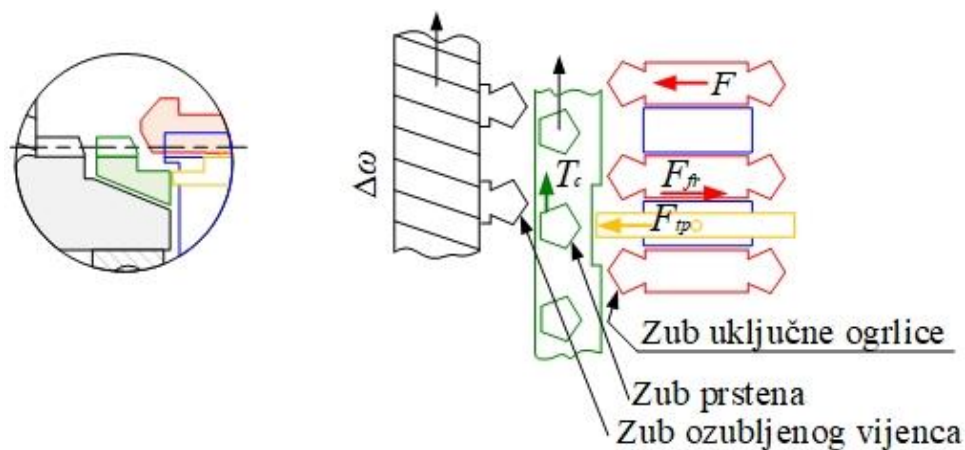


Slika 27. Shematski prikaz sinkronizacijskog sklopa

### 4.1. Matematički opis procesa sinkronizacije

Modeliranje je podijeljeno po fazama opisanim u potpoglavlju 2.2.

#### 4.1.1. Faza 1- inicijalni pomak uključne ogrlice



Slika 28. Faza 1

U fazi 1 sila  $F$  počne djelovati na uključnu ogrlicu kao što to prikazuje Slika 28. Zajedno s uključnom ogrlicom se počne gibati i tlačna pločica označena žutom bojom jer opruga održava njihov međusobni kontakt. Kada se tlačna pločica nasloni na sinkroni prsten, preko nje dio sile  $F$  počne djelovati kao aksijalna sila na konusnu spojku. Taj dio sile označen je s  $F_{tp}$  te je uzet kao konstantna vrijednost tijekom te faze sinkronizacije. Ostatak sile  $F$  se troši na ubrzavanje  $\ddot{x}_s$  uključne ogrlice mase  $m_s$ , te na silu trenja  $F_{fr}$  što je opisano jednačbom (11):

$$F - F_{tp} - F_{fr} = m_s \cdot \ddot{x}_s \quad (11)$$

Sila trenja  $F_{fr}$  se računa prema modificiranom klasičnom modelu [9] trenja koji za vrijeme klizanja računa silu trenja prema jednadžbi (12), a područje brzina oko nule je opisano strmom linearnim karakteristikom kako prikazuje Slika 29.

$$F_{fr} = F_C + (F_S - F_C) \cdot e^{-\frac{|v_{rel} - v_s| \cdot C}{F_S - F_C}} \quad (12)$$

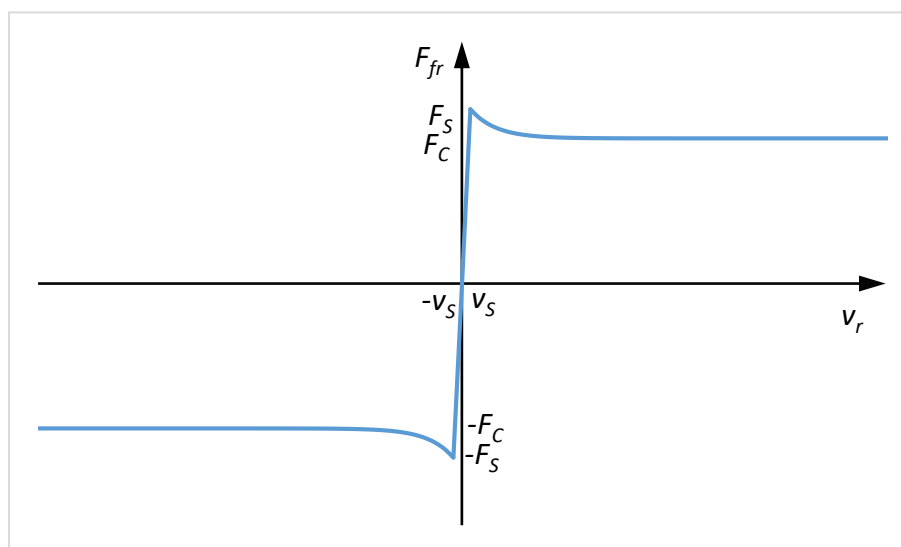
gdje je:

$F_C$  – sila Coulombovog trenja

$F_S$  – sila statičkog trenja

$v_{rel}$  – brzina klizanja

$v_s$  – Stribeckova brzina



**Slika 29. Modificirani klasični model trenja**

Aksijalna sila na sinkroni prsten  $F_{tp}$  stvara na konusnoj spojci moment  $T_C$  što je prikazano jednadžbom (13) čiji je izvod dan u dodatku A

$$T_C = F_{tp} \frac{\mu_C r_{cm}}{\sin \alpha} \quad (13)$$

gdje je:

$\mu_C$  – faktor trenja konusne spojke

$r_{cm}$  – srednji radijus trenja konusne spojke

$\alpha$  – kut nagiba konusne spojke

Trenje oko brzine nula je opisano Karnoppovim modelom koji je detaljnije opisan jednadžbom (15).

Moment  $T_C$  rotira prsten, a njegova kutna akceleracija se računa prema jednadžbi (14).

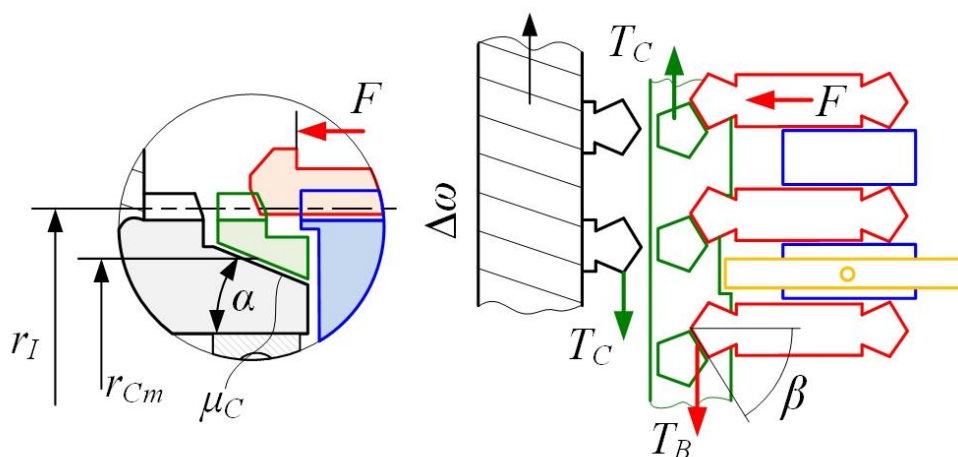
$$\varepsilon_{SR} = \frac{T_C}{J_{SR}} \quad (14)$$

Gdje je:

$J_{SR}$  – moment tromosti prstena

Kutna brzina i kut zakreta prstena se dobiju integriranjem kutne akceleracije.

#### 4.1.2. Faza 2- sinkronizacija brzine vrtnje



Slika 30. Faza 2

Uključna ogrlica dođe do zubiju sinkronog prstena i pošto se je prsten zakrenuo dogodi se kontakt zub na zub kojim se sila  $F$  prenosi preko prstena na konusnu spojku. Moment konusne spojke  $T_C$  koji se računa prema Karnoppovom modelu trenja koji je prikazan jednadžbom (15) djeluje na zupčanik i djelomično se troši na gubitke u obliku viskoznog trenja glavne spojke, a djelom na ubrzanje zupčanika i ulaznog vratila. Po Karnoppovom modelu [9] područje prijanjanja je opisano intervalom nulte brzine u kojem se relativna brzina klizanja  $\omega_{rel}$  nalazi u intervalu od  $-\omega_0$  do  $\omega_0$ . Moment konusne spojke u tom intervalu jednak je primijenjenom momentu  $T_p$  koji je u ovom slučaju jednak momentu potrebnim za svladavanje viskoznog trenja glavne spojke. Funkcija  $sat$  je funkcija zasićenja te osigurava da preneseni moment ne bude veći od statičkog moment trenja  $T_S$ . Reakcija momenta  $T_C$  na prsten djeluje u suprotnu stranu te održava prsten u blokirajućem položaju.

$$T_C = \begin{cases} \frac{F * \mu_C * r_{Cm}}{\sin \alpha} \cdot \text{sgn}(\omega) & \text{za } |\omega_{rel}| \geq \omega_0 \\ \text{sat}(T_p, T_S) & \text{za } |\omega_{rel}| < \omega_0 \end{cases} \quad (15)$$

Faktor trenja konusne spojke se računa prema jednadžbi (16).



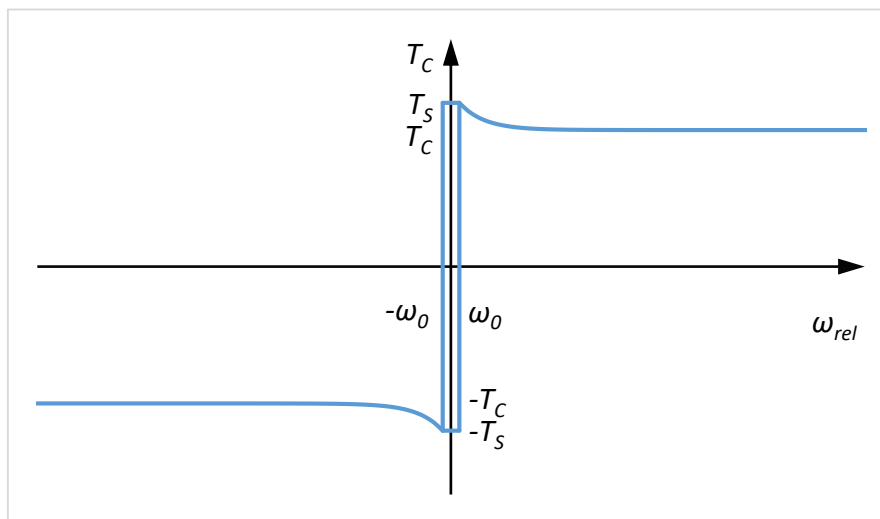
$$\mu_C = \mu_{C,sl} + (\mu_{C,st} - \mu_{C,sl}) e^{-\frac{|\omega_{rel}| \cdot C_C}{\mu_{C,st} - \mu_{C,sl}}} \quad (16)$$

Gdje je:

$\mu_{C,sl}$  – dinamički faktor trenja

$\mu_{C,st}$  – statički faktor trenja

Slika 31 prikazuje opisani Karnoppov model trenja.



**Slika 31. Karnoppov model trenja**

Tlačna pločica je iskočila iz utora na uključnoj ogrlici, te se cjelokupna sila  $F$  prenosi na prsten preko kontakta zubi kako prikazuje Slika 30.

Zbog nagiba zuba  $\beta$  na prsten djeluje blokirajući moment  $T_B$  koji nastoji zakrenuti prsten u središnji položaj. Jednadžba (17) prikazuje izračuna blokirajućeg momenta  $T_B$ . Izvod te jednadžbe je dan u dodatku B,

$$T_B = (F_{el} + F_{dam}) * r_I * \frac{1 - \mu_I * \tan \beta}{\mu_I + \tan \beta} \quad (17)$$

gdje je:

$r_I$  – efektivni polumjer zubi zupčaste spojke

$\mu_I$  – faktor trenja na dodiru zubi

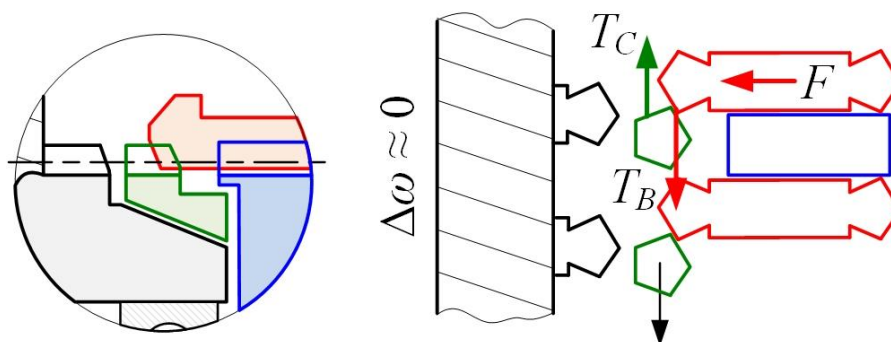
$F_{el}$  – elastična sila dodira zuba u aksijalnom smjeru

$F_{dam}$  – prigušna sila dodira zuba u aksijalnom smjeru

Kut nagiba zuba  $\beta$  je odabran tako da dok je konusna spojka u području klizanja moment  $T_C$  je veći od momenta  $T_B$ , te prsten ostaje u blokirajućem položaju kako je objašnjeno u poglavlju 2.3.

#### 4.1.3. Faza 3- deblokada prstena i sekundarni pomak ukljućne ogrlice

Kada brzina klizanja konusne spojke padne na nulu preneseni moment postaje samo moment potreban za svladavanje viskoznosti glavne spojke. Konusna spojka ulazi u interval nulte brzine vrtnje pa je moment  $T_C$  jednak viskoznom momentu glavne spojke koji je manji od blokirajućeg momenta  $T_B$ . Razlika tih dvaju momenata zakreće prsten u neutralni položaj čime se zubima ukljućne ogrlice omogućava gibanje prema ozubljenom vijencu zupčanika. Slika 32 prikazuje shematski prikaz faze 3.



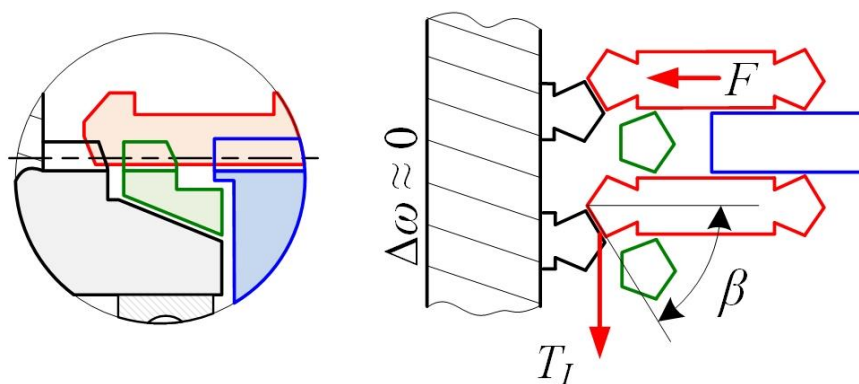
Slika 32. Faza 3

Kutna akceleracija prstena tijekom deblokiranja se računa prema jednadžbi (18).

$$\varepsilon_{SR} = \frac{T_C - T_B}{J_{SR}} \quad (18)$$

Kada se prsten zakrene u neutralni položaj moment  $T_C$  padne na nulu jer nestane aksijalna sila na prsten. Zbog toga se zupčanik počne opet relativno gibati u odnosu na vratilo uslijed gubitaka u sustavu jer ne postoji moment koji bi pokrio te gubitke.

#### 4.1.4. Faza 4- indeksiranje zupčaste spojke



Slika 33. Faza 4

U fazi 4 se događa kontakt uključne ogrlice i ozubljenog vijenca zupčanika. Zupčasta spojka se ne može uključiti sve dok postoji razlika u brzini vrtnje. Moment indeksiranja  $T_I$  koji nastaje zbog nagiba zubi te zbog međusobnog trenja zubi zupčaste spojke, sinkronizira brzine prije uključivanja zupčaste spojke a računa se prema jednadžbi (19) koja je izvedena u dodatku B,

$$T_I = (F_{el} + F_{dam}) * r_I * \frac{1 + \mu_I * \tan \beta}{\mu_I - \tan \beta} \quad (19)$$

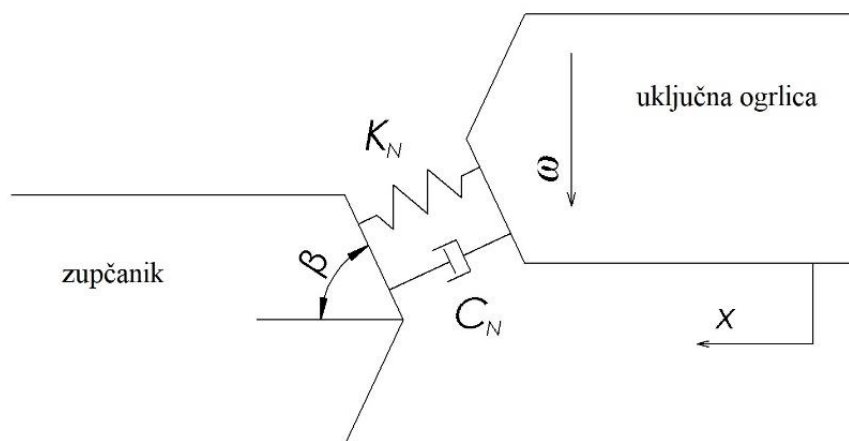
gdje je:

$r_I$  – efektivni polumjer zubi zupčaste spojke

$\mu_I$  – faktor trenja na dodiru zubi

$F_{el}$  – elastična sila dodira zuba u aksijalnom smjeru

$F_{dam}$  – prigušna sila dodira zuba u aksijalnom smjeru



**Slika 34. Dodir zubi uključne ogrlice i zupčanika**

Sile  $F_{el}$  i  $F_{dam}$  se računaju prema jednadžbama (19) i (20):

$$F_{el} = x * K_N * \sin \beta * (\sin \beta + \mu \cos \beta) = K_e * x \quad (20)$$

$$F_{dam} = \dot{x} * C_N * \sin \beta * (\sin \beta + \mu \cos \beta) = C_e * \dot{x} \quad (21)$$

gdje su:

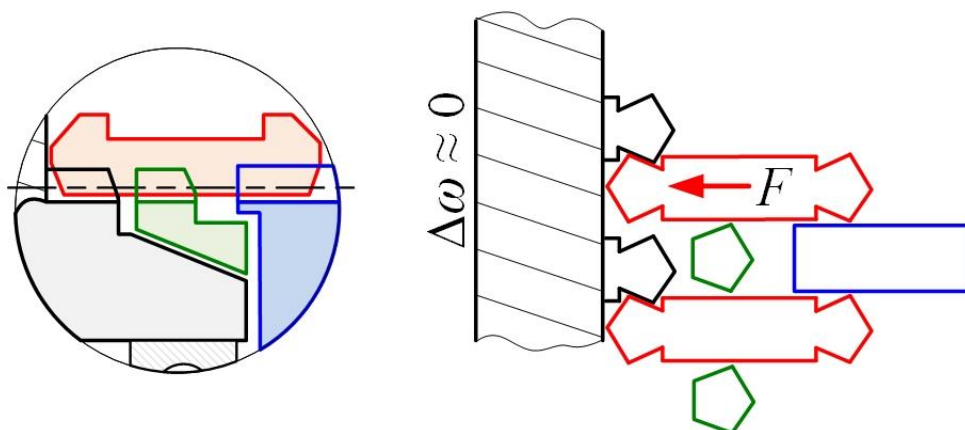
$K_N$  – krutost dodira u normalnom smjeru

$C_N$  – prigušenje dodira u normalnom smjeru

$x$  – relativni pomak uključne ogrlice u odnosu na  $x_I$

$x_I$  – pomak uključne ogrlice od neutralnog položaja do početka dodira sa zubima ozubljenog vijenca

#### 4.1.5. Faza 5



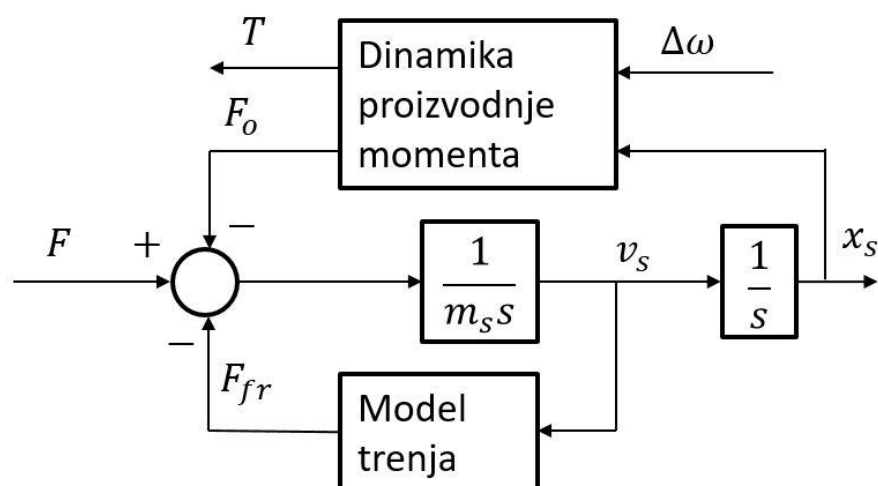
Slika 35. Faza 5

Nakon što se brzina izjednači uključna ogrlica može ući u uzubine na ozubljenom vijencu zupčanika te ona napreduje do krajnjeg položaja čime ona uključi zupčastu spojku i time je proces sinkronizacije završio, te je moguće spajanjem glavne spojke uspostaviti tok snage preko tog stupnja prijenosa.

#### 4.2. Blok dijagrami modela sinkrona

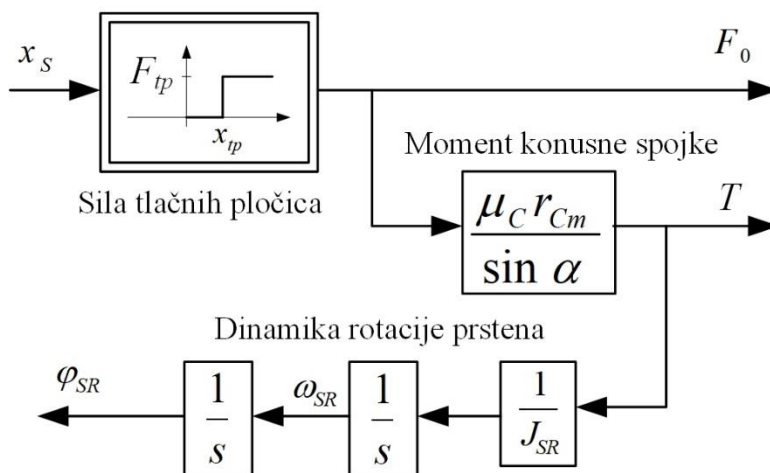
Na osnovi opisanog modela postavljenog u potpoglavlju 4.1 izrađeni su blok dijagrami koji će biti prikazani u ovom potpoglavlju te koji predstavljaju osnovu za implementaciju modela.

Slika 36 prikazuje glavni blok dijagram modela. Ulazna varijabla je sila na uključnu ogrlicu  $F$ , dok izlazne varijable uključuju moment koji djeluje na zupčanik  $T$ , te pomak uključne ogrlice  $x_s$ .  $F_0$  je sila reakcije elemenata na uključnu ogrlicu dok je  $F_{fr}$  sila trenja koja se opire aksijalnom gibanju ogrlice čiji opis daje Slika 29. Dinamika proizvodnje momenta  $T$  je ovisna o fazi u procesu sinkronizacije, te je njen opis dan u nastavku.



Slika 36. Glavni blok dijagram modela sinkrona

Za fazu 1 vrijedi  $x_s < x_r$ , gdje je  $x_r$  udaljenost zubi prstena od neutralnog položaja ukljućne ogrlice. Slika 37 prikazuje blok dijagram dinamike proizvodnje momenta za fazu 1. Sila  $F_0$  se generira uslijed naslanjanja tlačnih pločica na sinkroni prsten, dok je moment  $T$  posljedica djelovanja te sile.

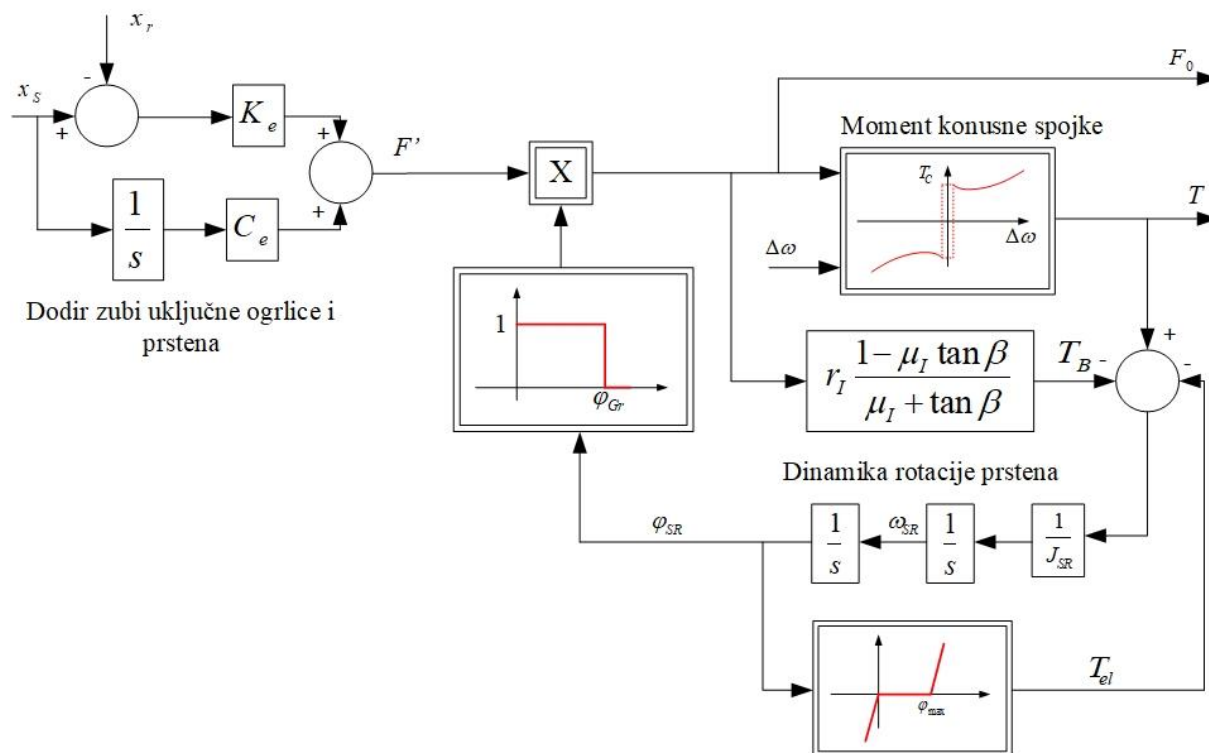


Slika 37. Blok dijagram faze 1- inicijalni pomak ukljućne ogrlice

Za fazu 2 vrijedi  $x_r < x_s < x_l$  i  $\varphi_{SR} < \varphi_{Gr}$ , gdje je  $\varphi_{SR}$  kut zakreta prstena, a  $\varphi_{Gr}$  granični kut iznad kojega je prsten u blokirajućem položaju, a  $x_l$  udaljenost zubi zupčanika od neutralnog položaja ukljućne ogrlice.

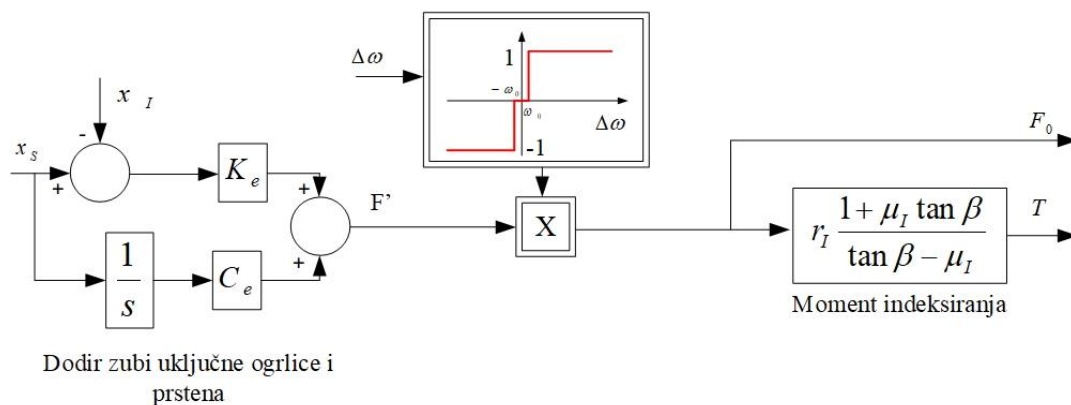
Za fazu 3 vrijedi  $x_r < x_s < x_l$  i  $\varphi_{SR} > \varphi_{Gr}$ .

Slika 38 prikazuje blok dijagram dinamike proizvodnje momenta za faze 2 i 3.



Slika 38. Blok dijagram faza 2 i 3

Za fazu 4 vrijedi  $x_s > x_I$ , te da postoji relativna brzina vrtnje zupčanika u odnosu na vratilo, tj. da je  $\Delta\omega > \omega_0$ . Slika 39 prikazuje dinamiku proizvodnje momenta tijekom faze 4.



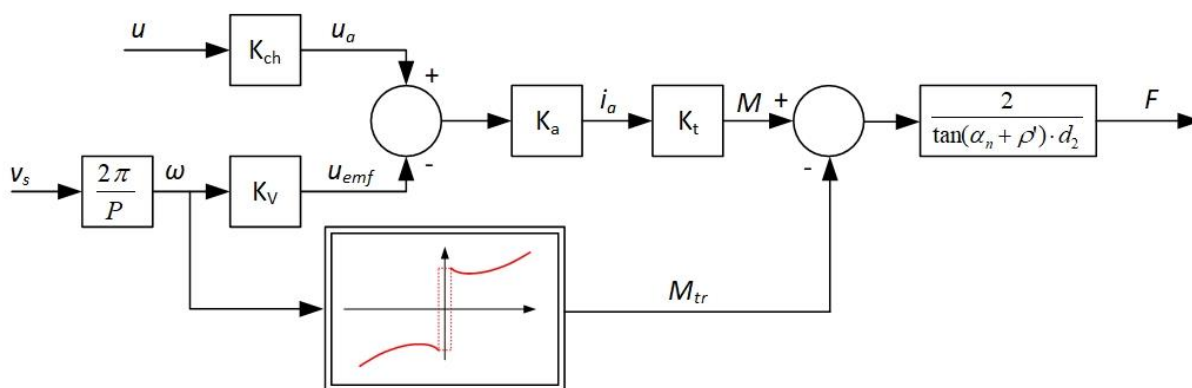
Slika 39. Blok dijagram faze 4

U fazi 5 su zupčanik i vratilo kruto vezani, brzine vrtnje su im izjednačene te se preko sinkrona prenosi sav primijenjeni moment.

#### 4.3. Model aktuatora

Kao aktuator je odabran istosmjerni motor te navojno vreteno koje pogoni uključnu vilicu.

Slika 40 prikazuje blok dijagram aktuatora [10]. Ulaz je upravljački signal  $u$ , a izlaz je sila na uključnu ogrlicu  $F$ . Za izračun kutne brzine motora  $\omega$  koristi se brzina uključne ogrlice  $v_s$  koja se dobiva iz modela sinkrona kojeg prikazuje Slika 36.



**Slika 40. Blok dijagram aktuatora**

Upravljački signal se množi sa pojačanjem istosmjernog pretvarača napona (tzv. čopera)  $K_{ch}$  da se dobije napon napajanja istosmjernog motora  $u_a$ :

$$u_a = K_{ch} \cdot u \quad (22)$$

Kutna brzina motora se dobije jednadžbom (23).

$$\omega = \frac{2\pi v_s}{P} \quad (23)$$

Gdje je:  $P$  – uspon navoja vretena

Inducirana elektromotorna sila motora  $u_{emf}$  je proporcionalna kutnoj brzini:

$$u_{emf} = K_V \omega \quad (24)$$

Uz zanemarivanje induktiviteta armature zbog vrlo male vremenske konstante (manje od 1 ms), struja armature  $i_a$  je proporcionalna naponu armature umanjenom za iznos inducirane elektromotorne sile, a moment motora  $M$  struji kao što prikazuju jednadžbe (25) i (26).

$$i_a = K_a(u_a - u_{emf}) \quad (25)$$

$$M = K_t i_a \quad (26)$$

$K_V$ ,  $K_a$ ,  $K_t$  su redom naponsko, armaturno i momentno pojačanje motora.

Za modeliranje trenja u motoru je uzet Karnoppov model trenja koji se računa prema jednadžbi (27) koja je analogna jednadžbama (15) i (16).

$$M_{tr} = \begin{cases} T_{cm} + (T_{sm} - T_{cm}) \cdot e^{-\frac{|\omega| - Dom}{OMs}} \cdot \text{sgn}(\omega) & \text{za } |\omega| \geq Dom \\ \text{sat}(M, T_{sm}) & \text{za } |\omega| < Dom \end{cases} \quad (27)$$

Gdje je:

$T_{Cm}$  – moment trenja klizanja

$T_{Sm}$  – statički moment trenja

$Dom$  – karakteristična konstanta Karnoppovog modela trenja

$OMs$  – Stribeck-ova brzina

$M$  – moment motora

Za model vretena se izračunavaju kut uspona vretena  $\alpha_n$ , te korigurani kut trenja  $\rho'$  prema jednadžbama (28) i (29).

$$\alpha_n = \tan^{-1} \frac{P}{d_2 \pi} \quad (28)$$

$$\rho' = \tan^{-1} \frac{\mu}{\cos \beta} \quad (29)$$

Gdje je:

$P$  – uspon vretena

$d_2$  – srednju promjer navoja vretena

$\mu$  – faktor trenja u navojima

$\beta$  – kut boka navoja

Aksijalna sila vretena se računa prema jednadžbi

$$F = \frac{2(M - M_{tr})}{\tan(\alpha_n + \rho') d_2} \quad (30)$$

Inercija rotora motora se reducira na uključnu ogrlicu. Prijenosni omjer je potreban za redukciju inercije i on se računa prema (31).

$$i = \frac{\omega}{v_s} = \frac{2\pi}{P} \quad (31)$$

Dodatak na masu ogrlice zbog inercije rotora se računa prema (32).

$$m' = i^2 J \quad (32)$$

Prijenosna funkcija koja povezuje brzinu vrtnje elektromotora i napon armature dana je jednadžbom (33), a izvedena je iz blok dijagrama aktuatora za slobodni hod uključne ogrlice kojeg prikazuje Slika 41.

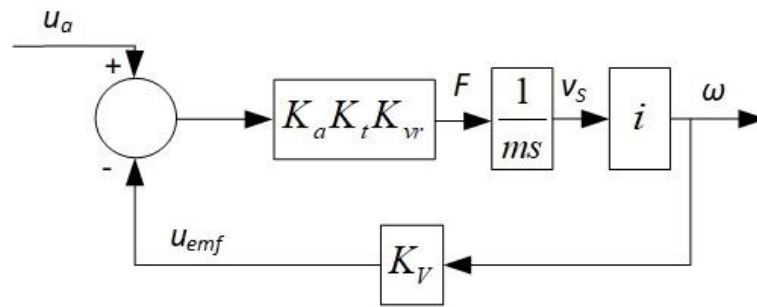
$$\frac{\omega(s)}{u_a(s)} = \frac{1}{K_v} \cdot \frac{1}{\frac{m}{K_a K_t K_v K_{vr} i} s + 1} \quad (33)$$

gdje je:

$m$  – ekvivalentna masa koja je zbroj mase ogrlice i dodatka danim izrazom (31)



$$K_{vr} = \frac{2}{\tan(\alpha_n + \rho') d_2} - \text{pojačanje vretena} \quad (34)$$



**Slika 41. Blok dijagram aktuatora za slobodan hod uključne ogrlice**

Izraz za vremensku konstantu  $T_{em}$  dan je izrazom (41), te njena vrijednost iznosi oko 12,5 ms.

$$T_{em} = \frac{m}{K_a K_t K_v K_{vr} i} \quad (35)$$

Uvrštavanjem vremenske konstante izraz (33) postaje:

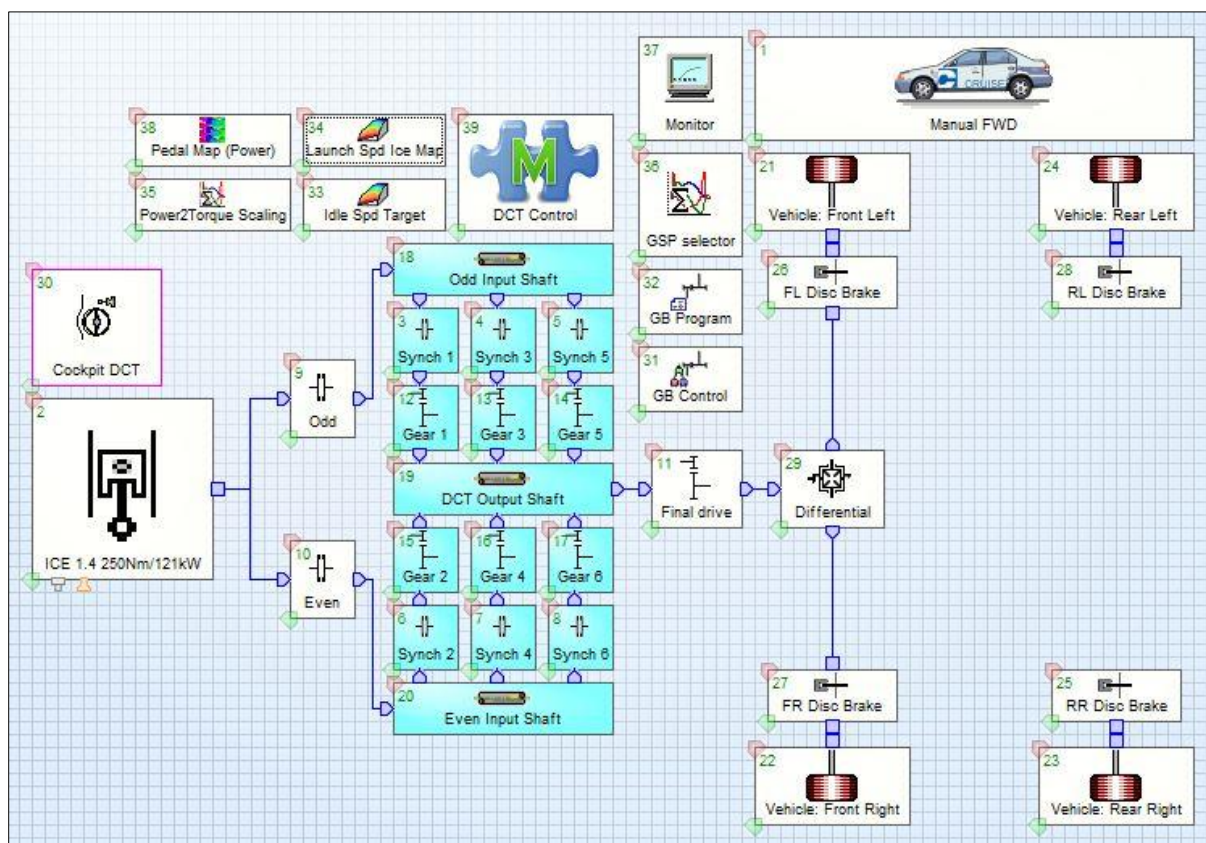
$$\frac{\omega(s)}{u_a(s)} = \frac{1}{K_v} \cdot \frac{1}{T_{em}s + 1} \quad (36)$$

## 5. SIMULACIJA I REZULTATI

### 5.1. Programski paket AVL CRUISE

Simulacija je provedena u programskom paketu AVL CRUISE. To je programski paket za simulaciju pogona vozila. Namijenjen je za određivanje potrošnje goriva, performansa, emisija štetnih plinova te voznih karakteristika vozila. Njegova modularna struktura omogućava modeliranje svih mogućih konfiguracija pogonskih sustava vozila uključujući i hibridna vozila. Jedno od tipičnih područja primjene CRUISE-a je detaljno modeliranje različitih vrsta transmisija uključujući ručne, automatske, električne i slično. Osim toga se koristi za generiranje mapa mijenjanja stupnja prijenosa te za njihovu optimizaciju s obzirom na potrošnju goriva i vozne karakteristike.

### 5.2. Model vozila

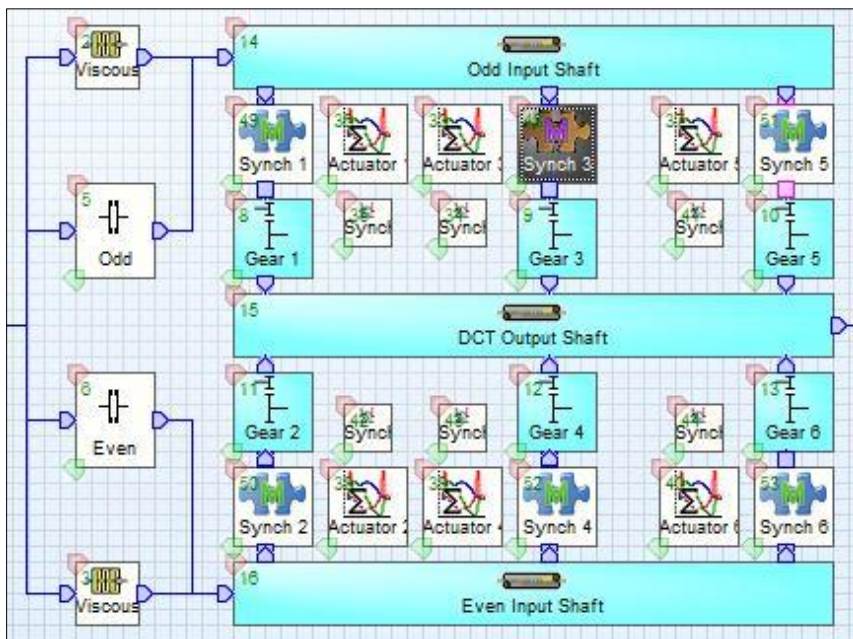


Slika 42. Prikaz modela vozila

Slika 42 prikazuje dobiveni model vozila s automatskom transmisijom s dvostrukom spojkom. Komponente transmisije s dvostrukom spojkom prikazane su plavom bojom. Osim dvije spojke sastoji se od dva ulazna vratila šest parova zupčanika, izlaznog vratila, te od šest tarnih spojki koje preuzimaju ulogu sinkrona. Transmisija je upravljana UDM komponentom *DCT Control*

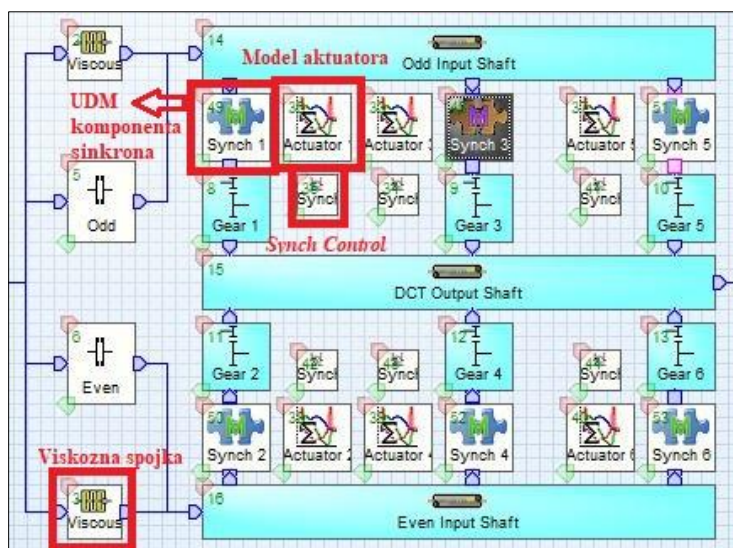
koja prikuplja podatke iz cijelog vozila te šalje signale na glavne spojke te na sinkrone o njihovim uključivanju.

Zadatak ovog rada je zamijeniti komponente šest tarnih spojki sa razvijenim modelom sinkrona koristeći korisničku (UDM) komponentu temeljenu na .dll izvršnoj datoteci generiranoj iz C-koda. Slika 43 prikazuje model transmisije sa zamijenjenim modelom sinkrona.



Slika 43. Novi model transmisije vozila

U model je ubačen par viskoznih spojki paralelno sa glavnim spojkama koje simuliraju gubitke u glavnoj spojci, komponenta s modelom akuatora, te komponenta *Synch Control* koja daje naredbu signala koja ulazi u akuator. Ove komponente prikazuje Slika 44.



Slika 44. Dodane komponente modela

### 5.3. Parametri simulacije

Tablica 2 prikazuje korištene parametre modela sinkrona u prikazanoj simulaciji. Tipične pozicije uključne ogrlice su odabrane iz uobičajenog raspona za te veličine, krutost i prigušenje kontakata zubi su odabrani provođenjem simulacija te analizom rezultata, dok su ostali parametri uzeti iz literature: [4], [7] i [8].

Tablica 2. Parametri modela sinkrona

| Naziv   | Oznaka          | Vrijednost       | Mjerna jedinica |
|---|-----------------|------------------|-----------------|
| Koeficijent trenja konusne spojke                                     | $\mu_C$         | 0,12             | -               |
| Srednji radijus konusne spojke  | $r_{Cm}$        | 0,0475           | m               |
| Kut nagiba konusne spojke   | $\alpha$        | 7                | °               |
| Masa uključne ogrlice   | $m_S$           | 2,7              | kg              |
| Pozicija uključne ogrlice na početku dodira tlačnih pločica i prstena | $x_{tp}$        | 0,0001           | m               |
| Pozicija uključne ogrlice tijekom sinkronizacije                      | $x_0$           | 0,001            | m               |
| Pozicija uključne ogrlice tijekom indeksiranja                        | $x_I$           | 0,007            | m               |
| Efektivni radijus zuba zupčaste spojke                                | $r_I$           | 0,06             | m               |
| Koeficijent trenja zubi   | $\mu_I$         | 0,04             | -               |
| Kut nagiba zuba   | $\beta$         | 65               | °               |
| Maksimalni položaj uključne ogrlice                                   | $x_{max}$       | 0,009            | m               |
| Krutost kontakta zubi zupčaste spojke                                 | $K_N$           | $1,2 \cdot 10^7$ | N/m             |
| Prigušenje kontakta zubi zupčaste spojke                              | $C_N$           | $1,2 \cdot 10^4$ | Ns/m            |
| Sila tlačnih pločica  | $F_{tp}$        | 50               | N               |
| Granični zakret sinkronog prstena                                     | $\varphi_{Gr}$  | 0,057            | rad             |
| Maksimalni zakret sinkronog prstena                                   | $\varphi_{max}$ | 0,06             | rad             |
| Stribeckova brzina konusne spojke                                     | $\omega_0$      | 1                | rad/s           |

Tablica 3 prikazuje parametre modela aktuatora. Korišteni istosmjerni motor se koristi kao motor elektroničke zaklopke [9] i [10], pa su stoga uzeti njegovi parametri iz postojećeg modela elektroničke zaklopke. Navoj navojnog vretena je odabran M8x1.

Tablica 3. Parametri modela aktuatora

| Naziv   | Oznaka   | Vrijednost | Mjerna jedinica |
|---|----------|------------|-----------------|
| Pojačanje armature                                  | $K_a$    | 0,5263     | -               |
| Pojačanje napona                                    | $K_V$    | 0,0184     | -               |
| Pojačanje <i>choppera</i>                           | $K_{ch}$ | 2,5        | -               |
| Uspon navoja vretena                                | $P$      | 1          | mm              |
| Pojačanje momenta                                   | $K_t$    | 0,0176     | -               |
| Srednji promjer navoja vretena                      | $d_2$    | 7,35       | mm              |
| Faktor trenja u navojima vretena                    | $\mu$    | 0,01       | -               |
| Kut boka navoja                                     | $\beta$  | 30         | °               |
| Karakteristična konstanta Karnoppovog modela trenja | $Dom$    | $\pi/3$    | rad/s           |

|                               |           |                     |                  |
|-------------------------------|-----------|---------------------|------------------|
| <b>Stribeckova brzina</b>     | $OMs$     | $\pi/10$            | rad/s            |
| <b>Moment trenja klizanja</b> | $T_{Cm}$  | 0,006               | Nm               |
| <b>Statički moment trenja</b> | $T_{Sm}$  | 0,008               | Nm               |
| <b>Napon baterije</b>         | $u_{bat}$ | 12,5                | V                |
| <b>Inercija rotora motora</b> | $J$       | $1,6 \cdot 10^{-6}$ | kgm <sup>2</sup> |

Dodatak na masu uključne ogrlice uslijed inercije rotora motora se računa prema (32):

$$m' = i^2 J = 63,2 \text{ kg} \quad (37)$$

gdje je prijenosni omjer  $i$ :

$$i = \frac{\omega}{v_s} = \frac{2\pi}{P} = 2000\pi \frac{1}{\text{m}} = 6283,2 \frac{1}{\text{m}}. \quad (38)$$

Iskoristivost vretena za dane parametre je dana jednadžbom (39) a u modelu je uračunata preko modificiranog kuta trenja  $\rho'$ .

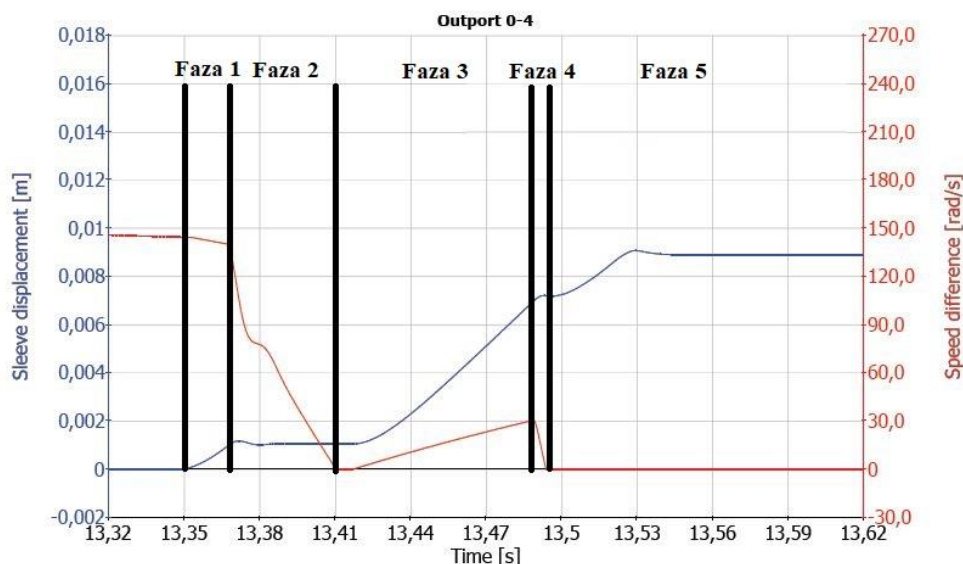
$$\eta = \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\alpha + \rho')} = 0,789 \quad (39)$$

#### 5.4. Rezultati

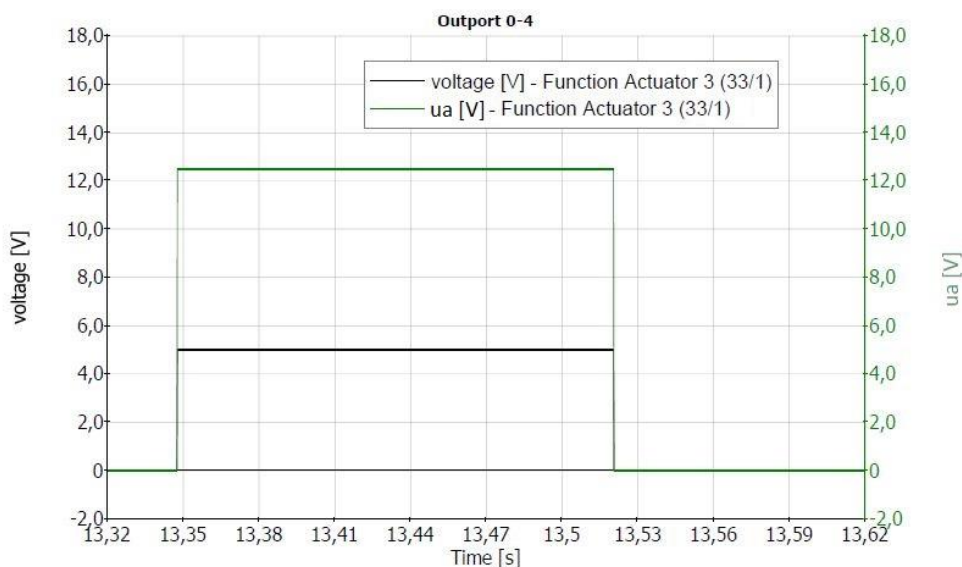
U ovom odlomku će biti prikazani rezultati simulacije modela pri sinkronizaciji trećeg stupnja prijenosa tijekom ubrzanja vozila. U vremensku od 13,35 s je primijenjen puni konstantni upravljački naponski signal od 5 V što rezultira armaturnim naponom  $u_a$  od 12,5 V što prikazuje Slika 46. Slika 45 prikazuje promjenu položaja uključne ogrlice u vremenu (označeno plavom bojom), te promjenu relativne brzine vrtnje zupčanika u odnosu na vratilo u vremenu (označeno crvenom bojom) te su označene faze procesa sinkronizacije opisane u poglavlju 2.2.

Brzina vrtnje prikazanog vratila je u trenutku prebacivanja u drugi stupanj prijenosa bila veća od brzine vrtnje radilice motora jer je još neko vrijeme bio uključen sinkron prvog stupnja prijenosa. Uslijed viskoznosti glavne spojke brzina ulaznog vratila se praktički izjednačila s brzinom radilice motora te je stoga prije uključivanja sinkrona brzina ulaznog vratila prilično konstantna s blagim padom jer se brzine nisu u potpunosti izjednačile. U vremenu od 13,35 s počne djelovati sila na uključnu ogrlicu čime počinje faza 1. Faza 2 počinje kada ogrlica dođe do zubiju prstena dogodi se impuls momenta jer se kinetička energija gibajućih dijelova pretvorila u elastično deformiranje zubi što je generiralo silu na konusnu spojku. Nakon smirivanja udara se uslijed sile na uključnu ogrlicu brzina vrtnje ulaznog vratila linearno smanjuje, pri čemu je gibanje uključne ogrlice blokirano na poziciji od 1 mm. Izjednačavanjem brzina vrtnje u vremenu od 13,41 s se počne zakretati prsten čime se odblokira gibanje uključne ogrlice što se događa u fazi 3. Pošto je zbog prethodne sinkronizacije nastala razlika u brzini

vrtnje radilice motora i ulaznog vratila, javlja se moment uslijed viskoznosti u glavnoj spojci koji ponovno uvećava brzinu vrtnje ulaznog vratila u vremenu od 13,42 s do 13,49 s. Na pomaku od 7 mm uključna ogrlica udara o zube ozubljenog vijenca na zupčaniku (faza 4) čime se generira impuls momenta koji izjednačava brzinu te omogućava daljnje napredovanje uključne ogrlice te uključivanje zupčaste spojke (faza 5).



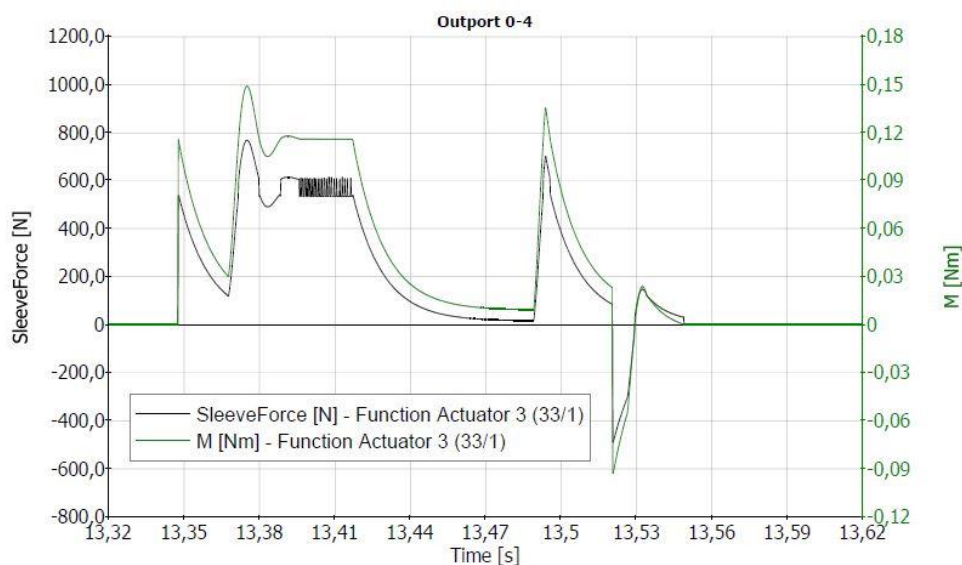
Slika 45. Pomak uključne ogrlice i razlika u brzini vrtnje



Slika 46. Upravljački signal i armaturni napon

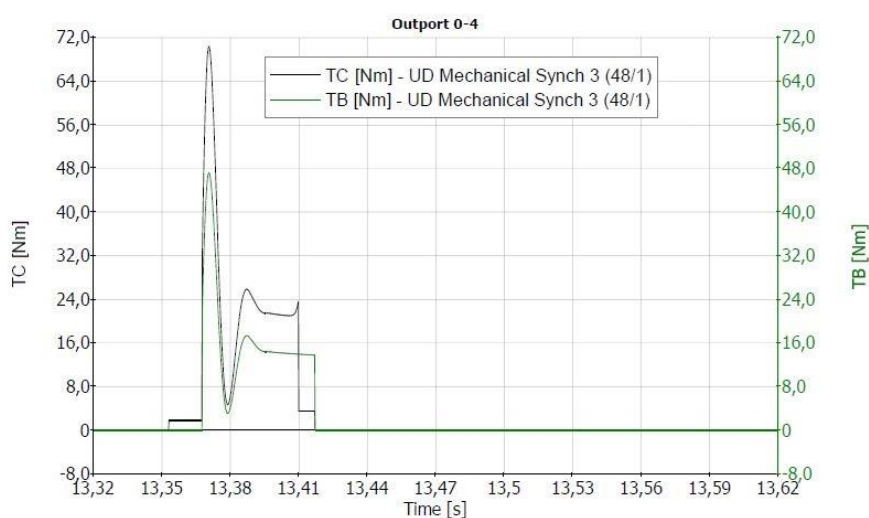
Slika 47 prikazuje silu na uključnu ogrlicu (označeno crnom bojom) i moment motora (označen zelenom bojom).





**Slika 47. Sila na uljučnu ogrlicu i moment motora**

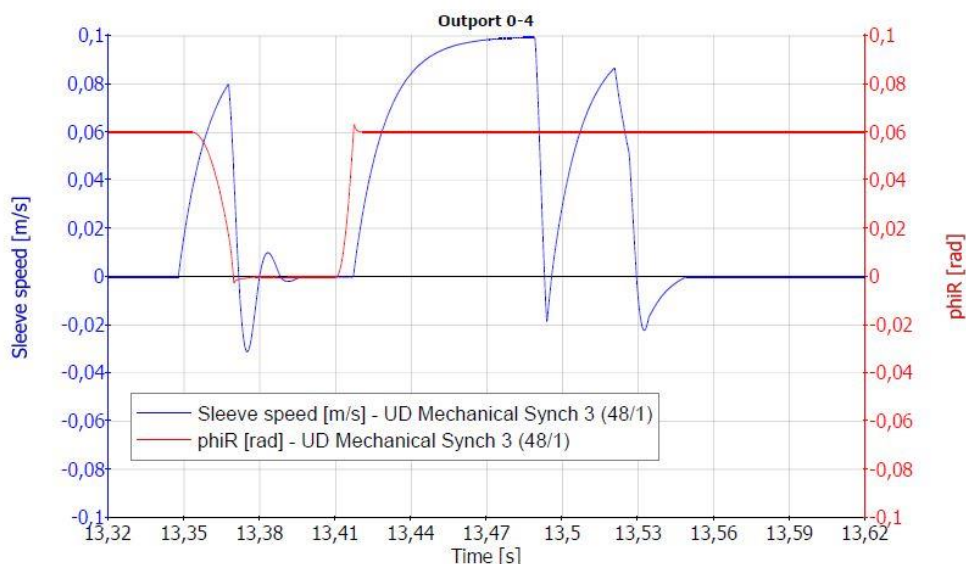
U trenutku početka procesa sinkronizacije moment motora naraste na 0,12 Nm. Kako se uključna ogrlica ubrzava povećava se i inducirana elektromotorna sila pa armaturna struja te moment motora tijekom gibanja ogrlice padaju. Tijekom sinkronizacije brzina ogrlice padne na 0, inducirana elektromotorna sila iščezne pa moment ponovno poraste. U trenutku prekidanja signala napona, uključna ogrlica se još uvijek giba pa postoji i elektromotorna sila zbog koje moment motora kratkotrajno padne u negativno područje (kočni moment). Sila na uključnu ogrlicu koji prikazuje Slika 47 se dobije da se od momenta motora oduzme moment trenja motora te uvrsti u model vretena.



**Slika 48. Moment konusne spojke i blokirajući moment**

Slika 48 prikazuje moment konusne spojke (označen crnom bojom), te blokirajući moment (označen zelenom bojom). Tijekom početnog pomaka uključne ogrlice na konusnu spojku djeluje sila tlačnih pločica koja generira relativno mali moment trenja koji blago smanjuje razliku u brzini vrtnje zupčanika i vratila (Slika 45), te zakreće sinkroni prsten. Kada se uključna ogrlica nasloni na zube sinkronog prstena ukupna sila na uključnu ogrlicu se prenosi na konusnu spojku koja izjednačava brzine vrtnje zupčanika i vratila te održava prsten u blokirajućem položaju. Zbog nagiba zubiju na prsten djeluje i blokirajući moment koji nastoji vratiti prsten u neutralni položaj. Kada se brzine izjednače u trenutku od 13,41 s moment konusne spojke  $T_C$  padne na relativno mali moment koji je potreban za savladavanje gubitaka uslijed viskoznosti glavne spojke, te koji je manji od blokirajućeg momenta zbog kojega se prsten zakrene čime se uključna ogrlica odblokira te se prestane prenositi sila na sinkroni prsten.

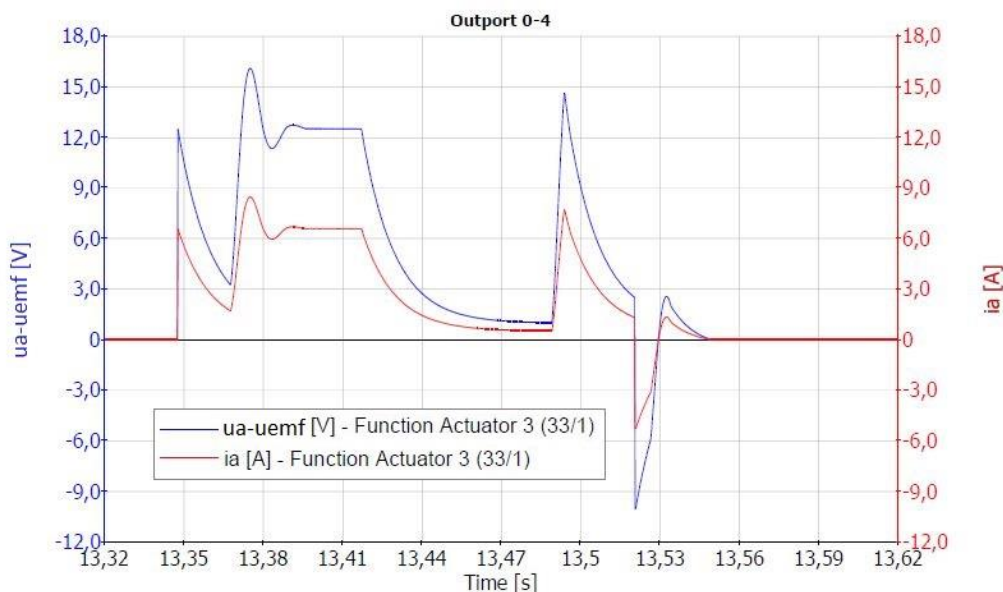
Slika 49 prikazuje brzinu uključne ogrlice (označeno plavom bojom), te kut zakreta sinkronog prstena (označeno crvenom bojom). Brzina uključne ogrlice se dobije integriranjem akceleracije koja je proporcionalna ukupnoj sili koja djeluje na uključnu ogrlicu. Kut zakreta prstena u neutralnom položaju je uzet 0,06 rad, a krajnji položaj kod blokiranja prstena je 0 rad. Moment trenja konusne spojke uslijed djelovanja sile tlačnih pločica zakreće prsten u blokirajući položaj, dok razlika blokirajućeg momenta i momenta konusne spojke zakreće prsten u neutralni položaj.



**Slika 49. Brzina uključne ogrlice i kut zakreta prstena**

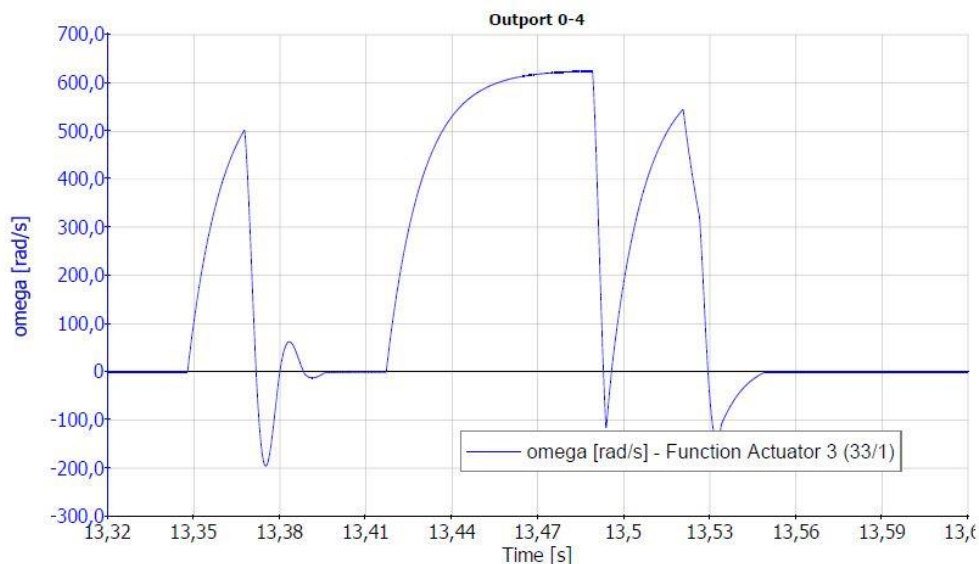
Slika 50 prikazuje struju armature motora (označeno crveno) i napon koji se dobije oduzimanjem napona armature i inducirane elektromotorne sile (označeno plavo).





Slika 50. Napon i struja armature

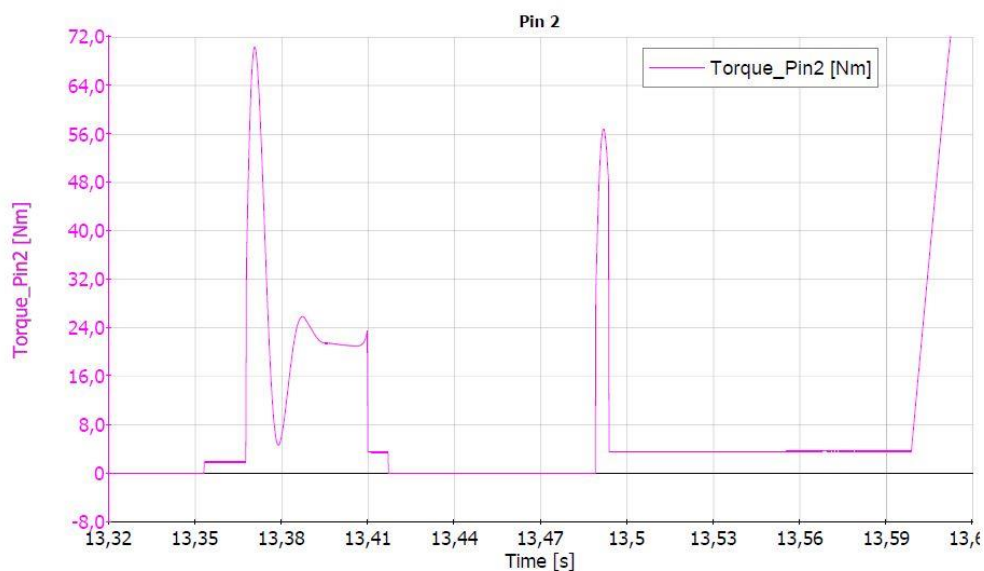
Slika 51 prikazuje brzinu vrtnje istosmjernog motora aktuatora koja se dobije iz brzine uključne ogrlice. Vidljivo je kašnjenje opisano vremenskom konstantom  $T_{em}$  koja je dana u jednadžbi (41) i iznosi 12,5 ms, što rezultira smirivanjem brzine vrtnje nakon otprilike 40 ms.



Slika 51. Brzina vrtnje motora

Slika 52 prikazuje promjenu momenta koji djeluje na zupčanik. U prvom djelu procesa sinkronizacije je moment na zupčanik jednak momentu konusne spojke. Nakon deblokade prstena taj moment pada na nulu, dok se kontaktom zubi uključne ogrlice i ozubljenog vijenca

stvara impuls momenta indeksiranja koji izjednačuje brzine vrtnje (Slika 45) te omogućuje uključivanje zupčaste spojke nakon čega se prenosi samo moment potreban za svladavanje viskoznog momenta glavne spojke. U vremenu od 13,60 s se počinje uključivati glavna spojka pa moment koji se prenosi preko sinkrona raste.



**Slika 52. Moment koji djeluje na zupčanic**

## 6. ZAKLJUČAK

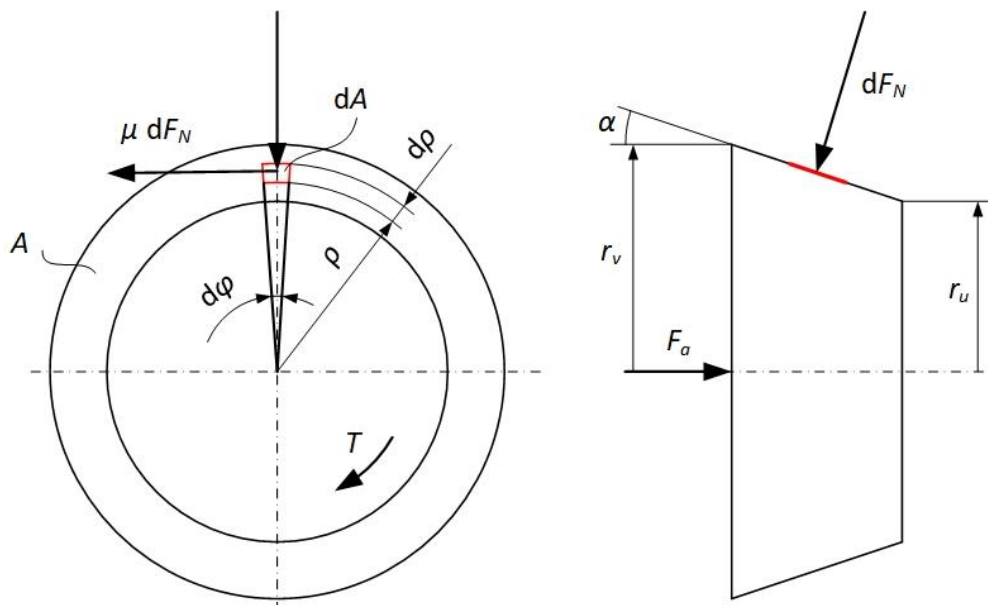
Ubrzanim razvojem automatskih transmisija važnu ulogu u izradi strategije upravljanja promjenom stupnja prijenosa zauzimaju računalne simulacije. Stoga je vrlo bitno imati detaljan matematički model same transmisije koje vjerno opisuje dinamičko ponašanje svih njenih dijelova. Neke izvedbe automatskih transmisija koriste komponente postojećih sustava manualnih transmisija, kao što su automatizirana manualna transmisija (AMT), te transmisija na bazi dvostrukih spojki (DCT). Kod njih važnu ulogu u procesu promjene stupnja prijenosa ima sinkronizacijski sklop. Stoga je u okviru ovog rada izrađen matematički model sinkronizacijskog sklopa te provedena njegova implementacija i simulacijska provjera u programskom paketu AVL CRUISE.

Za razliku od pojednostavljenih modela sinkrona (poput komponente *TRSY3A* u programskom paketu Amesim) modelirana je kružna dinamika sinkronog prstena, te je opisano deformiranje zubi zupčaste spojke. Ovo rezultira fizikalnijim te općenito točnijim opisom dinamike sinkronizacijskog procesa, ali se zbog relativno velike krutosti kontakta zubi dobiju vibracije razmjerno visoke frekvencije što iziskuje nemalo vrijeme provođenja simulacije (nepogodno za primjene u realnom vremenu). U programskom paketu Amesim je također dostupan detaljniji model sinkronizacijskog sklopa *Complex synchronizer* u odnosu na kojega je ovdje razvijen model jednostavniji jer je izostavljeno modeliranje aksijalne dinamike uključenog prstena, te je korišten jednostavniji model generiranja sile tlačnih pločica. Ta pojednostavljenja osim što skraćuju vrijeme simulacije čine model robusnijim na promjene raznih parametara čime je uporaba modela pojednostavljena.

S obzirom na navedeno ograničenje modela u pogledu simulacija u realnom vremenu, kao sljedeći razvojni korak nameće se tvorba kvazistacionarnog modela koji bi uz značajno skraćivanje vremena izvršavanja simulacije davao precizno statičko ponašanje te vjerni opis temeljnih (niskofrekvencijskih) modova dinamike sustava. Također bi bilo poželjno provesti eksperimentalnu identifikaciju i provjeru modela.

## Dodatak A: Moment konusne spojke

Slika 53 prikazuje tarnu plohu konusne spojke opterećenu aksijalnom silom  $F_a$ , te momentom  $T$ . Spojka se nalazi u procesu klizanja tarnih površina.



Slika 53. Tarna ploha konusne spojke

Na diferencijalnoj površini  $dA$  se uslijed dodira s drugom tarnom plohom javlja normalna sila  $dF_N$  te sila trenja  $\mu dF_N$ . Aksijalna sila  $F_a$  jednaka je integralu po površini  $A$  od projekcije sile  $dF_N$  na os rotacije spojke kao što prikazuje jednačba (40).

$$F_a = \int_A \sin \alpha dF_N \quad (40)$$

Momentu  $T$  se suprotstavlja moment trenja što prikazuje jednačba (41).

$$T = \int_A \mu \rho dF_N \quad (41)$$

Uz pretpostavku da je tlak jednoliko raspodijeljen na cijeloj površini nalijezanja  $A$  sila  $dF_N$  se može zapisati preko sile  $F_a$  na način:

$$dF_N = \frac{dA}{(r_v^2 - r_u^2)\pi} F_a \quad (42)$$

Površina diferencijalnog elementa se računa prema izrazu (43).

$$dA = \rho d\varphi \frac{d\rho}{\sin \alpha} \quad (43)$$

Uvrštavanjem izraza (42) i (43) u izraz (41) dobije se izraz (44) čijim integriranjem se dobije jednačba za moment konusne spojke:

$$T = \int_0^{2\pi} \int_{r_u}^{r_v} \mu \rho \frac{\rho}{(r_v^2 - r_u^2) \pi \sin \alpha} F_a d\rho d\varphi \quad (44)$$

$$T = \mu \frac{F_a}{\sin \alpha} \cdot \frac{2 (r_v^3 - r_u^3)}{3 (r_v^2 - r_u^2)} \quad (45)$$

Zbog jednostavnosti se uvodi veličina srednji radijus trenja konusne spojke prema jednadžbi (46).

$$r_{cm} = \frac{2 (r_v^3 - r_u^3)}{3 (r_v^2 - r_u^2)} \quad (46)$$

Prikazani izraz je izveden uz pretpostavku konstantne raspodjele tlaka što je prilično točno za nove i malo korištene spojke, dok se kod više korištenih vanjski dio više troši zbog veće brzine klizanja, pa se srednji radijus smanjuje i teži ka sredini između  $r_v$  i  $r_u$  kao što je prikazano jednadžbom (47).

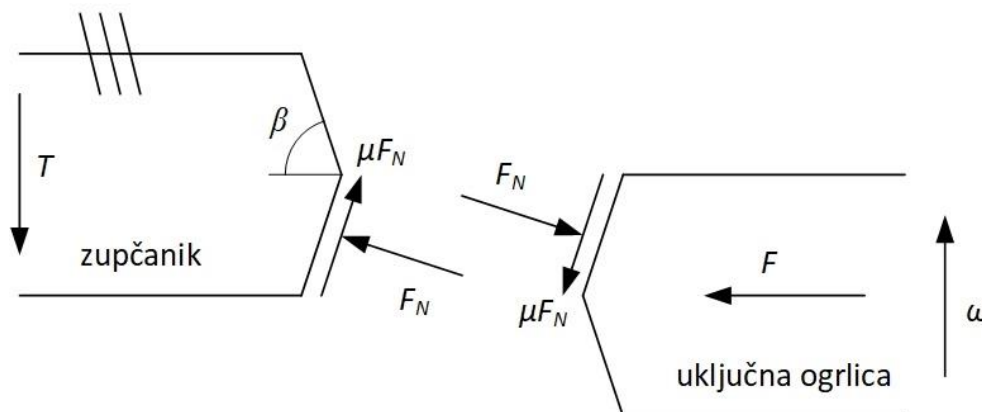
$$r_{cm} = \frac{r_u + r_v}{2} \quad (47)$$

Uvoženjem srednjeg radijusa trenja konusne spojke izraz za moment konusne spojke postaje

$$T = \frac{\mu \cdot F_a \cdot r_{cm}}{\sin \alpha} \quad (48)$$

## Dodatak B: Moment uključivanja zupčaste spojke

Slika 54 prikazuje kontakt zubi zupčaste spojke tijekom povezivanja zupčanika i uključne ogrlice u slučaju da postoji razlika u brzini vrtnje. Zbog jednostavnosti pretpostavimo da zupčanik miruje, a uključna ogrlica rotira u smjeru označenom na slici.



Slika 54. Kontakt zubi zupčaste spojke

Na mjestu kontakta se javljaju normalna sila  $F_N$  i sila trenja  $\mu F_N$ . Iz jednadžbe ravnoteže uključne ogrlice u aksijalnom smjeru se dobije jednadžba (49).

$$F = F_N \sin \beta - \mu F_N \cos \beta \quad (49)$$

Moment koji djeluje na zupčanik se računa prema jednadžbi (50)

$$T = (F_N \cos \beta + \mu F_N \sin \beta) r_i \quad (50)$$

gdje je  $r_i$  efektivni radijus zubi zupčaste spojke.

Ako se iz jednadžbe (49) izrazi sila  $F_N$  i uvrsti u jednadžbu (50) dobije se izraz (51) koji prikazuje moment indeksiranja zupčaste spojke.

$$T = F \frac{1 + \mu \tan \beta}{\tan \beta - \mu} r_i \quad (51)$$

U slučaju da je razlika u brzini vrtnje jednaka nuli i aksijalna sila djeluje na uključnu ogrlicu kao što je slučaj tijekom blokiranja sinkronog prstena, sila trenja mijenja smjer te se moment računa prema jednadžbi (52).

$$T = F \frac{1 - \mu \tan \beta}{\tan \beta + \mu} r_i \quad (52)$$

## **LITERATURA**

- [1] Naunheimer, H.; Bertsche, B.; Ryborz, J.; Novak, W.: Automotive Transmissions, Springer, 2011.
- [2] Tehnika motornih vozila, Pučko otvoreno učilište Zagreb, Centar za vozila Hrvatske, Hrvatska obrtnička komora, 2013.
- [3] Crolla, D.; Foster, D. E.; Kobayashi, T.; Vaughan, N.: Encyclopedia of automotive engineering, Wiley.
- [4] Walker, P. D.; Zhang, N.; Zhan, W.; Zhu, B.: Modelling and simulation of gear synchronisation and shifting in dual-clutch transmission equipped powertrains, 2012.
- [5] Amesim Users Guide
- [6] Ivanović, V.: Modeliranje i regulacija elemenata pogona vozila s izraženim učincima trenja, FSB Zagreb, 2010.
- [7] Walker, P. D.; Zhang, N.: Investigation os synchronizer engagement in dual clutch transmission equipped powertrains, 2012.
- [8] Bedmar, A. P.: Synchronization process and synchronizer mechanisms in manual transmission, Chalmers, 2013.
- [9] Deur, J.: Predavanja iz kolegija Automobilski mehatronički sustavi, Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [10] Deur, J.; Pavković, D.; Perić N.; Jansz, M.; Hrovat, D.: An Electronic Throttle Control Strategy Including Compensation of Friction and Limp-Home Effects, 2004.
- [11] Duan, C.: Analytical Study of a Dog Clutch in Automatic Transmission Application, General Motors Co. 2014.
- [12] Walker, P. D.; Zhang.: Engagement and control of synchronizer mechanisms in dual clutch transmissions, 2012.

## **PRILOZI**

I. CD-R disc